

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

SIMULACIONES NUMÉRICAS EN TELAS DE ARAMIDA EN 2D BAJO CONDICIONES DE IMPACTO

AUTOR: ALFONSO COGOLLO HUETE

TUTOR: MARCOS RODRÍGUEZ MILLÁN

JUNIO 2016

Agradecimientos

Llegados a este punto en el que se acaba un largo viaje que empezó hace ya cuatro años, es necesario acordarse de todas las personas que han hecho que este duro pero enriquecedor viaje pueda llegar, si todo sale bien con este Trabajo de Fin de Grado, a su fin.

Gracias en primer lugar a mi familia, sin ellos y sin su apoyo nada hubiera sido posible. Gracias también a los profesores con los que me he encontrado a lo largo de esta etapa y que nos han aportado su conocimiento y enseñanzas muy adecuadamente tanto a mí como al resto de mis compañeros. Gracias también a todos los compañeros que he conocido y, en especial a los amigos que me llevo y sin los que sin lugar a dudas hubiera sido muy difícil llegar hasta aquí, ese tráfico de conocimientos, apuntes y exámenes nos ha ayudado a todos a aprobar muchas asignaturas, sin olvidar los tiempos en los que no nos dedicábamos precisamente a estudiar.

Particularmente en la elaboración de este Trabajo de Fin de Grado también hay algunas personas que directa e indirectamente han contribuido y a las que también debo agradecer esta contribución. Gracias en primer lugar a mi tutor Marcos, por presentarme un tema tan interesante como éste y por su ayuda y apoyo siempre que se lo he solicitado, sin él nada hubiera sido posible. Gracias también a mi amigo Samuel por ayudarme con mis dificultades informáticas.

En definitiva, gracias a todos los que me han ayudado y han hecho posible que haya llegado hasta aquí.

Gracias.

Resumen

En el presente Trabajo de Fin de Grado se realizan simulaciones numéricas mediante el código comercial Abaqus, que utiliza el Método de los Elementos Finitos, sobre telas de aramida, y, más en concreto, de Kevlar, con el objeto de predecir el comportamiento mecánico frente a impacto balístico de estas telas.

El Kevlar es una aramida cuya primera aparición se remonta a 1965, lo que lo hace un material relativamente novedoso y, por tanto, no lo suficientemente estudiado hasta el momento. Posee unas propiedades mecánicas que lo hacen único, entre las que destaca un increíble ratio resistencia/peso, lo que hace que en los últimos años haya despertado el interés de muchos investigadores por sus numerosas aplicaciones.

Entre estas aplicaciones destaca el vestuario de protección balística (chalecos antibala, cascos y otros elementos de protección balística corporal), aplicación en la que se centra este documento, debido, en parte también, a la importancia que adquiere este tipo de elementos en la actualidad, provocada por la situación social que vive el mundo actualmente, donde los conflictos civiles y bélicos están, desgraciadamente, lejos de acabar, y la necesidad de protección tanto de las fuerzas militares como de las fuerzas y cuerpos de seguridad del estado de todos los países del mundo está latente.

Para estudiar el comportamiento de estas telas de Kevlar, en este documento se aporta la creación de un modelo numérico, validado mediante comparación de los resultados obtenidos con los artículos tanto experimentales como numéricos existentes en la literatura científica, que predice satisfactoriamente el comportamiento mecánico frente a impacto balístico de estas telas. Además, también se aporta el estudio de algunos de los factores principales que influyen en el comportamiento mecánico frente a impacto balístico de estas telas, validando los resultados obtenidos de la misma manera que antes, comparándolos con los existentes en la literatura científica actual y ofreciendo además, justificaciones de los mismos con fundamentos teóricos.

Índice

1	INTRODUCCIÓN	6
1.1	Motivación	7
1.2	Objetivos	8
1.3	Metodología	9
2	ESTADO DEL ARTE	10
2.1	Tejidos textiles (telas).....	11
2.2	Fibra de aramida: Kevlar	13
2.2.1	Aplicaciones de protección balística	14
2.3	Teoría de impactos balísticos.....	15
2.3.1	Proceso de impacto balístico	16
2.3.2	Concepto de límite balístico	17
2.3.3	Factores que influyen en el comportamiento balístico.....	18
3	TRABAJOS ANTERIORES.....	23
3.1	Ensayos experimentales.....	24
3.2	Simulaciones numéricas.....	26
3.2.1	Nivel macroscópico	27
3.2.2	Nivel mesoscópico.....	31
3.2.3	Modelos multiescala	33
4	ANÁLISIS NUMÉRICO.....	34
4.1	Método de los elementos finitos	35
4.1.1	Abaqus.....	37
4.2	Desarrollo del modelo numérico	38
4.2.1	Concepto de "Lamina"	39
4.2.2	Teorías de fallo	40
4.2.3	Creación del modelo	45
4.2.4	Validación del modelo.....	47
4.2.5	Conclusiones.....	48
4.3	Efecto del número de capas.....	49
4.4	Efecto de la geometría del proyectil	52
4.4.1	Proyectil cilíndrico	53

4.4.2	Proyectil cilíndrico de cabeza cónica.....	55
4.4.3	Comparativa	57
4.5	Efecto de las condiciones de contorno	57
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
5.1	Número de capas y geometría del proyectil	60
5.1.1	Evolución del impacto	61
5.1.2	Modo de fallo	66
5.2	Condiciones de contorno	70
5.2.1	Modo de fallo	71
6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	74
6.1	Conclusiones.....	75
6.2	Trabajos futuros	76
7	BIBLIOGRAFÍA.....	78



1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

A lo largo de la historia, las confrontaciones militares y las guerras no parecen acabar definitivamente. El nivel de protección personal contra las amenazas en los campos de batalla y en situaciones de disturbio en cualquier ciudad del mundo se ha ido desarrollando a lo largo del tiempo en concordancia con el avance de las armas de ataque. En diferentes puntos de la historia, se han usado diversos materiales para protección en relación con el tipo de armas de ataque existentes. Con la aparición de las armas de fuego, los soldados tuvieron que empezar a hacer frente a mayores amenazas en relación con otros tipos de armas, de esta manera, empezaron a buscarse materiales resistentes y ligeros dando lugar en la historia a una nueva generación de protección balística.

En esta nueva generación de protección balística aparecen principalmente los materiales reforzados con fibras así como tejidos textiles (telas) formadas por fibras ultra resistentes, los cuales dominan hoy en día el campo de la protección balística corporal. Además, estos campos de estudio han ido adquiriendo importancia a lo largo de los tiempos modernos gracias a la aparición de nuevas fibras de aramida de alta resistencia como el Kevlar o el Twaron.

Es por ello que en la actualidad resulta importante el estudio de este tipo de materiales. Actualmente, se realizan ensayos experimentales con ellos para predecir su comportamiento balístico y conseguir el diseño de nuevos sistemas de protección corporal, sin embargo, estos ensayos son muy costosos ya que conllevan la destrucción de numerosas muestras de tejidos hasta obtener los resultados deseados. De esta manera, hoy en día los ensayos numéricos, los cuales no conllevan coste alguno, adquieren una gran importancia con el objetivo de predecir el comportamiento mecánico frente a impacto balístico de este tipo de materiales.

Sin embargo, no abundan en la actualidad los artículos relacionados con este campo de estudio, no resultando sencillo encontrar en la literatura científica actual modelos numéricos fiables.

Este hecho, junto con el atractivo que tiene el campo de la protección personal y la importancia que cobra en la actualidad debido al desarrollo de las armas de fuego y los distintos materiales existentes empleados en la defensa de las mismas, son los principales motivadores en la elaboración de este proyecto.

1.2 Objetivos

El propósito principal de este proyecto es continuar con la labor de investigación existente en la actualidad sobre el campo de los tejidos textiles de protección balística, aportando un granito de arena en un campo no muy estudiado históricamente en relación a otros, pero en el que, poco a poco, va creciendo el interés a medida que aumentan los investigadores y los estudios realizados sobre él.

Para ello se ha utilizado el código comercial Abaqus, que emplea el Método de los Elementos Finitos para realizar simulaciones numéricas con el objeto de predecir el comportamiento mecánico de cualquier problema, en este caso, impactos balísticos en tejidos textiles. De esta manera, se establecieron los siguientes objetivos particulares en la elaboración del proyecto, objetivos que de cumplirse suponen aportaciones propias a este campo de estudio:

- Creación de un modelo numérico válido para predecir el comportamiento frente a impacto balístico de tejidos textiles formados por fibras de aramida, cuyos resultados concuerden positivamente con los existentes en la literatura científica para modelos sobre el mismo tipo de tejidos.
- Analizar algunos de los efectos principales que tienen influencia en el comportamiento balístico de este tipo de tejidos:
 - Número de capas del sistema. Se trata de un efecto que es muy importante conocer en la actualidad para el óptimo diseño de los sistemas de protección balística actuales, como son chalecos antibala o cascos de defensa que portan con asiduidad las fuerzas y cuerpos de seguridad de todos los países del mundo.
 - Geometría del proyectil impactante. Es otro de los efectos que se precisa conocer para el diseño de los sistemas de protección balística y lo estudiaremos más adelante en este documento con el objetivo de conocer la dimensión de las consecuencias que puede tener.
 - Condiciones de contorno del problema. Así como el número de capas o la geometría del proyectil, las condiciones de contorno del problema también tienen especial importancia en el comportamiento balístico de estos tejidos, por lo que será también de estudio a lo largo del documento.
- Demostrar la validez de los resultados obtenidos en los distintos estudios llevados a cabo, comparando con otros existentes en la literatura científica, así como establecer la justificación de los mismos con fundamentos teóricos.

1.3 Metodología

Para la consecución de estos objetivos, se ha procedido llevando a cabo los pasos que se detallan a continuación que, además, marcan la estructura del documento:

- I. **Búsqueda y análisis de información.** En primer lugar, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de información acerca del tema sobre el que trata el presente documento, con objeto de familiarizarse con los términos y conceptos propios del campo de los ensayos balísticos sobre tejidos textiles así como de ir asentando conocimientos para, posteriormente, poder aplicarlos para la consecución de los objetivos fijados. Aparte de los conocimientos teóricos sobre el campo de estudio que se debían de conocer, también se dio especial importancia al análisis de la literatura científica existente sobre este campo, con el fin de conocer y aprender la manera en que científicos tanto antiguos como actuales han realizado sus estudios y ensayos sobre el tema que tratamos para, de esta manera, poder fijarse y constituir una base sobre la que se llevan a cabo en posteriores apartados los estudios que comprenden el presente documento.
Este paso se corresponde con los capítulos 2 (Estado del Arte) y 3 (Trabajos Anteriores) del documento.
- II. **Creación y validación del modelo.** Una vez asentados los conocimientos necesarios, se procedió a la creación de un modelo propio con el cual poder efectuar los estudios propuestos. Para ello, antes de poder llevar a cabo dichos estudios, se debía validar el modelo creado comparando los resultados que éste proporcionaba con los existentes en la literatura científica para ensayos similares.
Este paso se corresponde con los primeros apartados del capítulo 4 (Análisis Numérico) del documento.
- III. **Elaboración de estudios y análisis de resultados.** Una vez validado el modelo propio ya se podía proceder a realizar todos los estudios deseados. Para cada estudio llevado a cabo, se han comparado todos los resultados obtenidos con los existentes en la literatura científica para estudios similares, así como se han explicado y analizado estos resultados para darles un fundamento teórico.
Este paso se corresponde con los últimos apartados del capítulo 4 (Análisis Numérico), que comprenden los resultados obtenidos para los estudios realizados, y con el capítulo 5 (Análisis de Resultados), que comprende el análisis de los resultados obtenidos en dichos estudios.

Posteriormente a estos pasos, se presentan las conclusiones obtenidas tras la realización del proyecto, los trabajos futuros propuestos, así como la bibliografía utilizada para la elaboración del proyecto.



2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Tejidos textiles (telas)

Hay muchas maneras de fabricar tejidos textiles a partir de fibras tal y como se indica en [1]. La categoría más común y compleja, comprende telas formadas a través del entrelazamiento de hilos, estos hilos se constituyen a su vez de cientos de fibras, que pueden ser cerámicas, de vidrio, de aramida... según la aplicación para la que se vayan a emplear. El entrelazamiento de los hilos se puede llevar a cabo de diversas maneras, dando lugar a distintos tipos de telas, la forma más común y en la que nos vamos a centrar en este documento es la de los llamados tejidos textiles *woven* (*woven fabrics*) los cuales se forman entrelazando dos sistemas de hilos perpendiculares los unos a los otros: uno longitudinal, *warp* (trama) y otro transversal, *weft* (urdimbre). Otros tipo de telas formadas por entrelazamiento de hilos son los tejidos textiles *knitted*, los cuales se producen conectando los lazos formados por los dos sistemas de hilos, o los tejidos textiles *braided*, que resultan del entrelazamiento diagonal de los hilos.

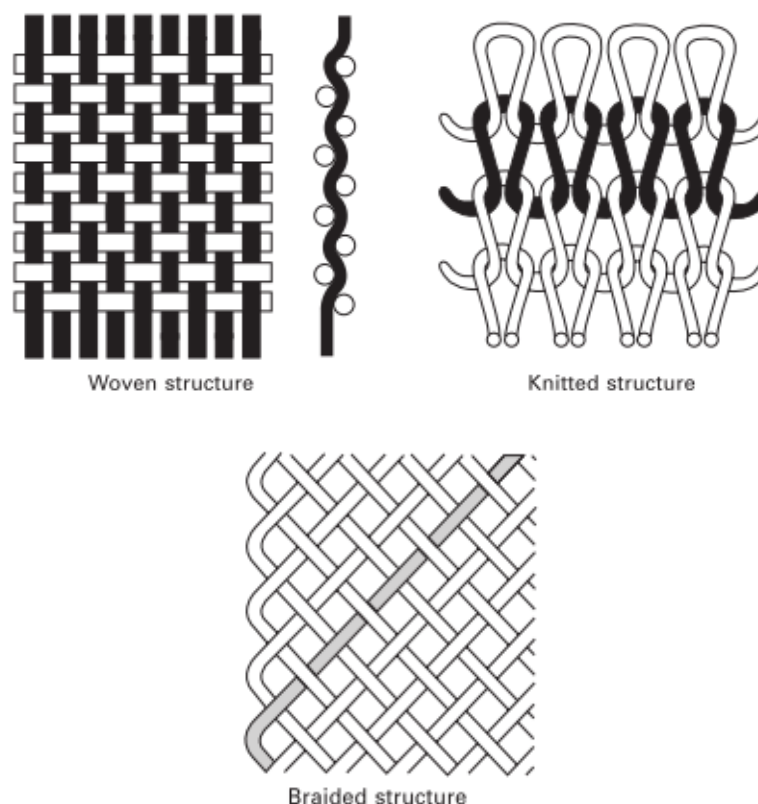


Figura 1: Tipos de estructura para formar tejidos textiles [2].

Los rasgos principales que caracterizan a un tejido *woven* según [3], aparte de los hilos trama y urdimbre, son el orillo, la cuenta del tejido, el espesor y el peso. Los orillos son los hilos en sentido longitudinal que se encuentran en los extremos de la tela y que evitan que se desgarre el tejido (se puede apreciar claramente en la siguiente figura), además al estar en el sentido longitudinal de la tela nos pueden servir para diferenciar la trama (longitudinal) de la urdimbre

(transversal). El número de hilos de trama y urdimbre por pulgada se llaman cuentas de trama y urdimbre respectivamente. La cantidad de cuentas de trama y urdimbre es la cuenta total del tejido. En general, pequeños tamaños de hilo y tejidos más densos proporcionan una mayor cuenta del tejido, lo que indica una mejor calidad del mismo y, por consiguiente, un precio más elevado de la tela. La densidad del tejido, puede ser caracterizada por el *cover factor* (factor de cobertura) [4] del mismo, el cual es determinado por la anchura y longitud de los hilos de trama y urdimbre y nos da una indicación sobre el porcentaje de área total cubierta por la tela.



Figura 2: Tejido textil *woven* hecho de Kevlar 720 que aparece en [3].

A menudo los tejidos textiles pueden ser impregnados con un material matriz (también llamado resina o material de relleno). Sin embargo, el comportamiento estructural de los tejidos textiles es significativamente diferente al que exhiben los "clásicos" materiales compuestos, en los cuales el porcentaje de material matriz es una parte mucho más significativa de la estructura completa.

Según el porcentaje de material matriz presente en su estructura, los tejidos textiles pueden clasificarse según [5] en:

- Tejidos secos (*dry fabrics*): contienen únicamente hilos entrelazados, no tienen material matriz.
- Ligeramente impregnados (*slightly impregnated fabrics*): contienen un pequeño porcentaje de material matriz.

Cuando el porcentaje de material matriz supera ampliamente al de estos dos tipos de tejidos textiles, el conjunto fibra-material matriz pasa a considerarse material compuesto, exhibiendo, como ya hemos comentado, un comportamiento estructural diferente al de las telas.

En este documento nos vamos a centrar en los tejidos textiles secos de estructura *woven*, formados por fibras de aramida, más concretamente, de Kevlar.

2.2 Fibra de aramida: Kevlar

Durante las últimas décadas, se han desarrollado muchas fibras distintas de alta resistencia para aplicaciones de protección frente a impactos balísticos. Estas fibras son, por lo general, ligeras y poseen a su vez excepcionales características de absorción de energía. Una de estas fibras, que es en la que se centra este proyecto, es el *poliparafenileno tereftalamida*, más conocido como Kevlar.

Durante los años 60, la compañía DuPont estaba interesada en obtener una fibra más resistente que el nailon, que junto con el polyester representaban por aquella época el estado del arte en lo que a fibras hechas por el hombre se refiere. Hasta entonces las soluciones empleadas para la formación de fibras eran transparentes, por lo que cuando obtenían soluciones opalescentes las descartaban. Sin embargo, en 1965, la química polaco-estadounidense Stephanie Kwolek (1923-2014), quien trabajaba para DuPont, decidió hilar el producto de estas soluciones, obteniendo así la fibra de aramida que todos conocemos como Kevlar.

La palabra "aramida" es un término genérico de "fibra manufacturada en la que la sustancia formadora de la fibra es una larga cadena de poliamida sintética, en la cual al menos el 85% de los enlaces de tipo amida están directamente unidos a dos anillos aromáticos", como está definido por el *US Federal Trade Commission*.

Las fibras de Kevlar son muy estudiadas en el mundo de la ingeniería gracias a unas propiedades mecánicas que las hacen únicas. Estas propiedades, proporcionadas por la propia compañía Dupont en [6], demuestran que las fibras de Kevlar, comparadas con otras fibras sintéticas, poseen un módulo de Young significativamente superior (80-120 GPa), así como una mayor resistencia a tracción. Esta resistencia a tracción, que puede alcanzar los 3.5 GPa (dependiendo del tipo de fibra) es incluso mayor que la del acero (1.5 GPa), el cual es mucho más pesado. Además, siguiendo con la comparación con el acero, las fibras de Kevlar poseen una elongación a rotura que puede llegar a alcanzar el 3.6%, cuando un acero típico rompe en torno al 1% de su deformación, lo que convierte al Kevlar en un material más tenaz que el acero, capaz de absorber una mayor cantidad de energía antes de su rotura.

En cuanto a su comportamiento térmico hay que decir que para ser un material polimérico presenta buenas propiedades a altas temperaturas. No se derrite, sino que se descompone a temperaturas relativamente altas (427-484 °C). Es capaz de mantener parte de sus propiedades mecánicas hasta cerca de esta temperatura de descomposición, momento en el que se reducen su módulo de Young, resistencia a tracción y elongación a rotura.

La típica fibra de Kevlar tiene un diámetro de 10-15 μm , cientos de estas fibras se atan formando lo que se conoce como hilos. El tamaño de estos hilos se mide mediante una unidad de densidad de masa lineal que se conoce como *Denier*, la cual depende del tipo de fibra de Kevlar y se define como la masa en gramos por cada 9 kilómetros de longitud de hilo [3]. Como

hemos comentado en el apartado anterior, los hilos formados por cientos de fibras atadas, se enlazan formando telas convencionales, las cuales son ampliamente usadas en compuestos y aplicaciones en prendas de protección balística y partes de aviones y barcos.

Dependiendo de la aplicación ingenieril para la que se desarrollan, existen muchos tipos distintos de fibras de Kevlar, que difieren en módulo, resistencia y elongación a rotura. Algunos de estos tipos y sus principales aplicaciones, explicados por la propia compañía Du Pont que los comercializa [7] son:

- **Kevlar 29:** Es la fibra tal y como se obtiene de su fabricación. Se usan principalmente en aplicaciones balísticas y vestuario de protección.
- **Kevlar 49:** Se emplea cuando las fibras se van a embeber en una resina para formar un material compuesto. Se utiliza principalmente como refuerzo para plásticos, en equipamiento para deportes marinos y en aplicaciones aeroespaciales.
- **Kevlar 119:** Es un tipo de fibra con más elongación, más flexible y resistente a la fatiga que se encuentra en neumáticos, correas y mangueras de automóviles.
- **Kevlar 129:** Son fibras más livianas, de alto rendimiento y tenacidad. Sus principales aplicaciones son equipos de carreras de motocicletas y mangueras de alta presión utilizadas en las industrias del petróleo y el gas.
- **Kevlar KM2:** Son las que se emplean para formar telas. Se utilizan principalmente en cascos y chalecos militares.

2.2.1 Aplicaciones de protección balística

Gracias a las excepcionales propiedades mecánicas comentadas anteriormente, las fibras de Kevlar son ampliamente usadas en la industria militar. Uno de sus usos más característicos, gracias a su gran ratio dureza-peso es el de la ropa de protección balística. Las fibras destinadas a este fin se fabrican en forma de tejidos textiles planos *woven* secos, formados, como se comentó en apartados anteriores, mediante el entrelazamiento de hilos en direcciones perpendiculares. Este tipo de vestimenta se constituye de un panel balístico, el cual se encuentra ensamblado de múltiples capas de tejidos balísticos. Cuantas más capas tenga la prenda, más segura será, sin embargo será más pesada y, por tanto, más incómoda de llevar para su portador.

Hoy en día, se estima que un soldado en el campo de batalla es capaz de llevar una carga total de 70 kg, de los cuales 14-17 kg corresponden a sistemas de protección corporal (*Conference Communication*, 2009), es por ello que en la actualidad los estudios relacionados con este campo se centran en la obtención de sistemas de defensa corporales que reduzcan el peso de los mismos, manteniendo o incluso mejorando su comportamiento balístico.

Sin embargo, hay que decir, que este tipo de prendas no son completamente impenetrables ni totalmente eficientes, puesto que existen calibres de bala que consiguen superar su defensa.

Cuando un proyectil impacta en una de estas prendas a una velocidad inferior al límite balístico (concepto del que se hablará en mayor profundidad más adelante), es gradualmente frenado hasta ser finalmente atrapado por el panel balístico. La energía de impacto del proyectil es transformada en energía cinética y de deformación de la tela, energía de deformación del proyectil y energía disipada por fricción. La resistencia a impacto de un panel balístico depende por tanto en su capacidad de absorber energía localmente en la zona del impacto y dispersarla rápidamente más allá de esta misma zona.



Figura 3: Ejemplos de chalecos antibala fabricados con Kevlar [8] y [9].

2.3 Teoría de impactos balísticos

Con el objetivo de comprender mejor la manera en la que se producen los impactos balísticos frente a telas de protección, así como los fenómenos que ocurren durante el mismo, en el presente apartado se pretende explicar de forma teórica los sucesos que ocurren en este proceso de impacto, así como los factores y parámetros principales que afectan al mismo.

Como punto de partida se describirá el proceso de impacto transversal del proyectil en una sola fibra, fenómeno descrito en [4] y en [10], así como su extrapolación al impacto del mismo en una tela. Más adelante se presentará el concepto de "límite balístico" y se señalarán y explicarán los factores que afectan al comportamiento balístico frente a impacto en un tejido textil.

2.3.1 Proceso de impacto balístico

Cuando un proyectil impacta en una fibra, dos ondas, una longitudinal y otra trasversal se propagan a partir del punto de impacto. La onda de tensión longitudinal viaja a través del eje de la fibra a la velocidad del sonido del material, la cual viene dada por:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

donde E y ρ son el módulo de Young y la densidad del material respectivamente. A medida que esta onda se propaga más allá del punto de impacto, el material tras el frente de la misma fluye hacia el punto de impacto, el cual se ha desviado en la dirección del movimiento del proyectil impactante. Este movimiento trasversal de la fibra es la onda trasversal, la cual se propaga a una velocidad menor que la del material.

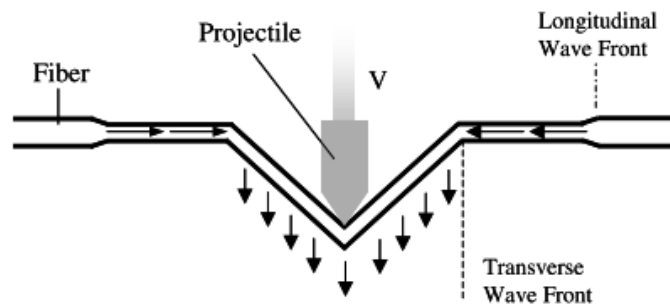


Figura 4: Proyectil impactando en fibra [4].

Apreciando las similitudes entre el impacto trasversal en una tela con el impacto trasversal en una sola fibra, Cuniff afirmaba en [10] que cuando un proyectil impacta en la tela, se produce una desviación trasversal en los hilos principales (hilos que están en contacto directo con el proyectil) y se generan ondas de tensión longitudinales que se propagan a la velocidad del sonido del material a través de los ejes de los hilos. Adicionalmente, los hilos ortogonales (hilos que intersecan a los hilos principales) son sacados fuera del plano original del tejido por los hilos principales. Análogamente, estos hilos ortogonales conducen de la misma manera a los hilos con los que intersecan. Esta interacción entre hilos, la cual es función de la fricción entre ellos, produce inclinación, desalineación de los hilos ortogonales hacia el punto de impacto. La desviación trasversal continúa hasta que la deformación en el punto de impacto alcanza la deformación de rotura.

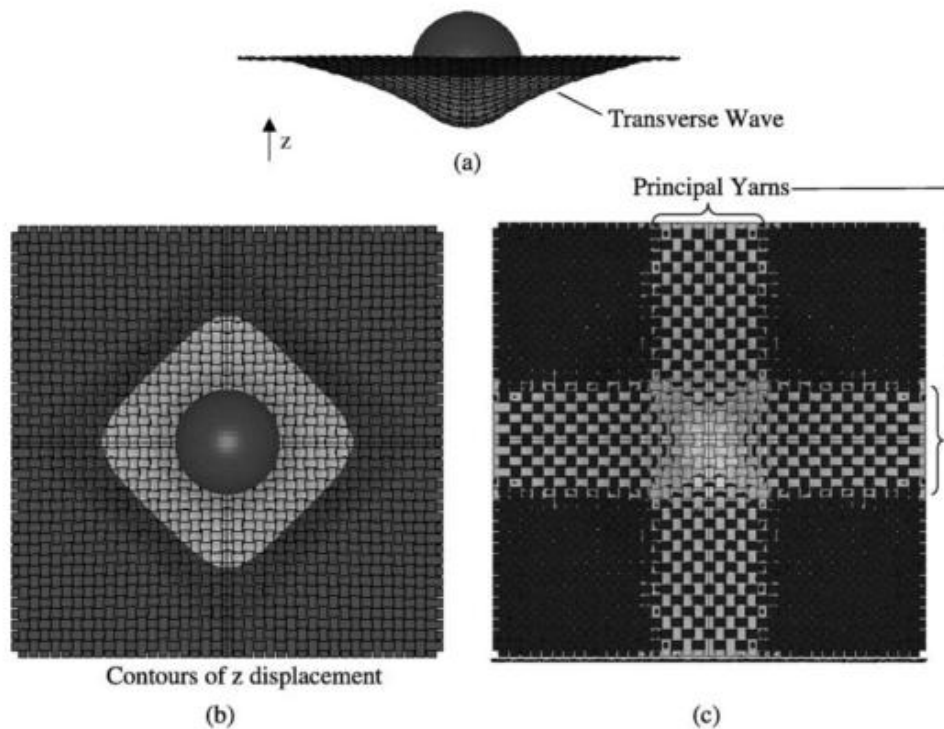


Figura 5: Proyectoil esférico impactando una tela [11].

De la expresión escrita anteriormente se puede deducir fácilmente que cuanto más alto sea el módulo de Young del material y más baja su densidad, más rápido se propagará la onda a través de los hilos, lo que provocará que el número de hilos involucrados en el proceso de absorción de energía será mayor, incrementando así la energía de disipación a medida que las deformaciones y las tensiones son rápidamente transmitidas a los hilos adyacentes. Recordemos que cuanto mayor energía sea capaz de absorber y disipar una tela, mejor será su comportamiento frente a impacto.

2.3.2 Concepto de límite balístico

En este proyecto, principalmente durante la presentación de los distintos estudios y análisis de resultados, se habla mucho del "límite balístico" de una tela o panel balístico. Es por ello que se dedica este apartado a la definición y explicación de este concepto.

En la literatura científica, se habla frecuentemente de la V_x de un sistema de protección balística. Esto se refiere a la velocidad de impacto del proyectil a la que existe una probabilidad de un $X\%$ de penetración del mismo. El límite balístico, de esta manera, para ensayos experimentales, se define como la velocidad de impacto del proyectil a la cual la probabilidad de que el mismo penetre el sistema de protección balística es de un 50% (V_{50}).

Para ensayos numéricos, en los que todas las simulaciones realizadas sobre un mismo modelo a una misma velocidad de impacto del mismo proyectil van a dar el mismo resultado, el límite balístico se define como la velocidad límite a la cual el sistema de protección balística es capaz de detener el proyectil, produciéndose la penetración del mismo a velocidades superiores a esta velocidad límite.

2.3.3 Factores que influyen en el comportamiento balístico

Como explican Cheeseman y Bogetti en [4] y Taibiei y Nilakantan en [12] existen varios factores que tienen influencia en el proceso de impacto de un proyectil balístico contra una tela. Estos factores son:

- **Propiedades del material.**

Cuando se produce el impacto, los hilos que forman la tela experimentan un acentuado incremento de tensión, magnitud la cual está relacionada con la velocidad de impacto del proyectil. A una velocidad no excesivamente elevada, el incremento inicial de tensión es insuficiente para romper las fibras, dando de esta manera tiempo a la desviación trasversal y la extensión resultante del hilo para propagarse, resultando en la absorción de energía por parte de la tela.

Como ya hemos comentado anteriormente, materiales con módulos de Young altos y densidades bajas proporcionan un mejor comportamiento frente a impacto balístico gracias a su elevada velocidad de la onda de deformación, provocando la distribución de energía sobre un área mayor de la tela. Aparte del módulo de Young y la densidad, hay otras propiedades de la tela que influyen en su comportamiento balístico, propiedades como la resistencia a tracción o la deformación a rotura del hilo. En 1999, Cuniff [13] derivó una propiedad adimensional para fibras, definida como el producto de la dureza específica de la fibra por la velocidad de la onda de deformación (velocidad del sonido del material):

$$U^* = \frac{\sigma \epsilon}{2\rho} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Donde σ es la resistencia última a tracción de la fibra y ϵ es la deformación a rotura de la misma. Desarrollada como una herramienta para evaluar en una primera aproximación el comportamiento de la tela frente a impacto balístico, este comportamiento no está completamente definido por estas propiedades, pero sí relacionado con ellas.

- **Estructura de la tela.**

La respuesta de una tela ante un impacto balístico no puede ser únicamente determinada por las propiedades de las fibras que forman la tela, sino que también la geometría de la misma juega un papel importante para producir una respuesta estructural. Las telas deben poseer factores de cobertura entre 0.6 y 0.95 para que sean efectivas al ser utilizadas en aplicaciones balísticas. Cuando el factor de cobertura supera el 0.95, los hilos son típicamente degradados por el proceso de tejido de la tela y cuando el factor de cobertura es menor a 0.6, la tela puede estar demasiado “suelta”. Las telas que presentan esta última característica son conocidas como telas *loosely* (holgadas). Cuando un proyectil impacta una tela, ésta se deforma transversalmente y los hilos se expanden resultando en el agrandamiento de los espacios entre ellos. En telas holgadas, y especialmente cuando el proyectil es pequeño e impacta con un determinado ángulo, el proyectil puede deslizarse y “colarse” a través de los espacios formados entre los hilos debido a la deformación de los mismos. Este fenómeno es conocido como “*wedge through*” o “*windowing*” y se puede observar en la siguiente imagen:

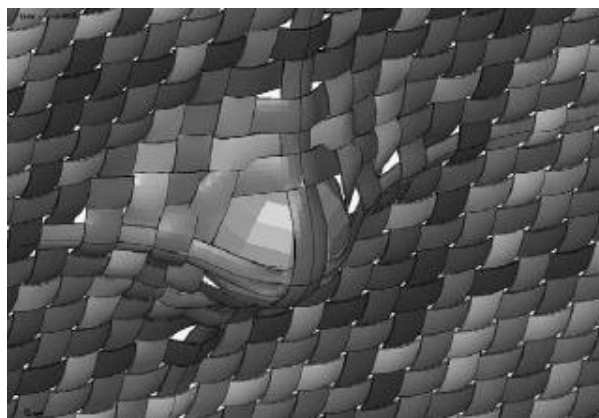


Figura 6: Representación del fenómeno conocido como *wedge through* en una tela holgada en [14].

Otra de las propiedades estructurales de la tela que tiene influencia en el comportamiento de la misma frente a impacto balístico es el rizo. El rizo es la ondulación de los hilos debido al entrelazamiento en la estructura *woven*. En un tejido plano, el grado de rizo está desequilibrado, los hilos de trama están típicamente más ondulados que los de urdimbre. De esta manera, ya que los hilos de urdimbre tienen menos rizo, romperán antes que los hilos de trama, que necesitan más tiempo para “desrizarse” y elongarse hasta el fallo. Para solucionar este problema, en 1993 Chitrangad [15] propuso usar hilos de urdimbre que tuvieran mayor elongación a rotura que los hilos de trama, para que, de esta manera, ambos rompieran a la vez.

- **Número de capas.**

A lo largo de los últimos años, se han desarrollado experimentos balísticos en los que un proyectil impactaba un sistema de varias capas de telas. En uno de estos experimentos, Cunniff

[10], observó que varias capas de tela espaciadas entre ellas eran capaces de absorber más energía que sistemas de varias capas pegadas. Sin embargo, más adelante se demostró que para algunas geometrías de proyectil y velocidades de impacto, son los sistemas de capas los que tienen más capacidad de absorción de energía que las capas espaciadas. Es por ello que cabe afirmar que este debate necesita mayor investigación futura.

Cuando un proyectil puntiagudo impacta un sistema formado por varias capas de tela, las primeras capas son perforadas en la forma de la superficie del proyectil impactante, mientras que el resto se comportan como una membrana, esto es, las capas cercanas a la superficie de impacto se comportan de forma inelástica, mientras que las más alejadas se comportan de forma elástica. De esta manera, se podrían reemplazar las capas más cercanas a la superficie de impacto por capas de otros materiales más baratos con las mismas propiedades inelásticas, sin significar ello pérdida de eficacia. Este hecho de que un sistema balístico formado por varias capas presente distintos materiales se llama hibridización, y ha sido muy estudiado y experimentado a lo largo de los últimos años, existiendo en la actualidad un gran número de patentes y sistemas de defensa balística comercialmente disponibles.

El efecto del número de capas será uno de los principales objetos de estudio en el presente documento más adelante.

- **Fricción.**

La fricción juega un rol muy importante en el comportamiento de las telas frente a impacto balístico. La fricción entre los hilos y entre el proyectil y los hilos tiene un efecto indirecto en el proceso de absorción de energía de la tela, influenciando en el número de hilos que se involucran en el mismo. El aumento de la fricción entre los hilos dificulta el movimiento relativo entre ellos y requiere al proyectil involucrar y romper un número mayor de hilos, lo que resulta en una mayor cantidad de energía absorbida. El aumento de la fricción entre el proyectil y los hilos retrasa la rotura de los mismos distribuyendo la máxima tensión a lo largo de la periferia de la zona de contacto entre el proyectil y la tela, lo cual incrementa sustancialmente la energía absorbida por la tela durante el impacto.

Además, en sistemas de varias capas, la fricción entre ellas es también una fuente de disipación de energía y debe por tanto ser tomada en cuenta.

- **Tamaño de la muestra y condiciones de contorno.**

Cuando se realizan ensayos de impacto balísticos, el tamaño de la muestra y la forma en la que quedan fijados los extremos y los laterales de la misma durante el proceso de impacto, son aspectos importantes que cabe tener en cuenta.

Cuanto mayor sea el tamaño de la muestra (mayor área de tela), mayor energía será absorbida por la misma, manteniendo constantes el resto de parámetros y no siendo la velocidad de impacto excesivamente elevada. Cuando la velocidad de impacto es excesivamente elevada, sólo un pequeño área alrededor de la zona de impacto es responsable de la absorción de energía, por lo que toda la deformación está concentrada en esa zona y, por tanto, el tamaño de la muestra no tiene influencia alguna en el proceso.

En cuanto a las condiciones de contorno, Shockey et al. [16] observaron que las telas sujetas en dos ejes eran capaces de absorber mayor cantidad de energía que las sujetas en 4 ejes, hecho que estudiaremos en este proyecto más adelante, además, en estas telas se absorbe mayor cantidad de energía cuando los hilos están orientados a 45 grados de los ejes que cuando están colocados paralelos a ellos, ya que de esta manera (45 grados), la tela entera está involucrada en el proceso de disipación de energía.

- **Geometría del proyectil.**

La geometría del proyectil influencia su capacidad para perforar la tela. Cuanto más grande sea el proyectil, mayor será el área de impacto en la tela y mayor por tanto será el número de hilos que debe romper el proyectil para perforarla.

Las balas puntiagudas tienen la habilidad de “colarse” (proceso *wedge through* explicado anteriormente) a través de la tela y no son frenadas tan rápidamente como las balas desafiladas. De esta manera, los proyectiles de punta cónica u ojival son capaces de deslizar a través de los espacios formados en la tela y perforarla, necesitando así una velocidad menor para hacerlo que los proyectiles de punta hemisférica o plana. El proyectil de punta hemisférica es el que produce mayor cantidad de estiramiento del hilo, necesitando más velocidad para perforar la tela que el proyectil de punta plana, el cual atraviesa a través del grosor de los hilos gracias a sus afilados extremos.

Más adelante estudiaremos este efecto de la geometría del proyectil en el comportamiento balístico de la tela.

- **Velocidad de impacto.**

Ya ha sido comentado que altas velocidades de impacto junto con proyectiles puntiagudos tienden a perforar la tela atravesándola a través de sus hilos antes de extenderlos hasta el fallo. A bajas velocidades de impacto, los hilos no fallan durante el aumento inicial de tensión, por tanto la desviación trasversal de la tela tiene tiempo para propagarse hasta los extremos, envolviendo así más área de tejido en la absorción de energía, llevando así a aumentar la cantidad de energía disipada. Con un impacto a alta velocidad, el daño es localizado y el fallo de los hilos ocurre antes de que se pueda producir una desviación trasversal significativa.

En 2002, Shahkarami et al. [17], investigando numéricamente el efecto de la masa del proyectil en la absorción de energía, distinguieron tres regiones distintas en el gráfico de energía absorbida por la tela frente a velocidad de impacto del proyectil. La Zona I correspondía a la región subcrítica donde el proyectil era completamente frenado por la tela. La Zona II se caracterizaba por una deformación global y por una acumulación de energía de deformación que la precede. En la Zona III (zona a mayor velocidad), el proyectil pierde una porción muy pequeña de su energía incidente y el fallo está altamente localizado en los hilos del área de impacto.



3 TRABAJOS ANTERIORES

3.1 Ensayos experimentales

No son numerosos los artículos presentes en la literatura científica en los que se lleven a cabo ensayos experimentales de impactos balísticos en tejidos textiles, es por ello que no ha resultado sencillo encontrar artículos en los que en concreto este ensayo de impacto se llevase a cabo en telas formadas por fibras de Kevlar. Además, se ha intentado buscar entre la literatura más reciente posible, para no caer en modelos de experimentación ya antiguos y obsoletos.

De esta manera, con el objeto de conocer la manera en la que se llevan a cabo en la realidad este tipo de ensayos experimentales y para poder comprender cómo se comportan este tipo de tejidos frente a impacto, así como para obtener datos experimentales de velocidades de impacto y residuales, en el presente apartado se procede a hablar de uno de estos artículos, la metodología que presenta y los resultados que nos ofrece.

❖ **Experimental investigation of the role of frictional yarn pull-out and windowing on the probabilistic impact response of Kevlar fabrics [18].**

En este artículo del año 2014, los autores estudian experimentalmente las respuestas probabilísticas frente a impacto en tejidos planos de Kevlar *greige* (estado de la tela inmediatamente posterior a su formación por entrelazamiento de hilos) y *scoured* (telas que después de su formación se someten a un tratamiento de limpieza para mejorar su acabado y preparar la superficie para posibles tratamientos posteriores).

El material usado en este estudio es el Kevlar S706 un tejido textil plano equilibrado formado por hilos de Kevlar KM2 de 600 denier entrelazados formando una estructura *woven*, con una cuenta de 34 hilos por pulgada. La tela tiene una densidad de superficie de 180 g/m^2 y un espesor aproximado de 0.23 mm. Los proyectiles usados son balas esféricas de acero del calibre 0.22 con una masa de 0.692 g.

El material y las herramientas, que se pueden observar en la siguiente imagen, con los que se llevó a cabo el experimento y las distintas mediciones son los siguientes:

- ✓ Estructura fija en forma de octógono equilátero de 42.09 mm de lado formada por dos placas (una frontal de acero y una trasera de aluminio) sobre la que se fija la tela de Kevlar a la que se somete a impacto.
- ✓ Cañón de gas que se encarga de disparar el proyectil.
- ✓ Dos cronógrafos de luz situados delante del objetivo para medir la velocidad del proyectil previa a impacto.
- ✓ Dos pantallas de luz situadas detrás del objetivo para medir la velocidad residual del proyectil para los impactos que penetren la tela.

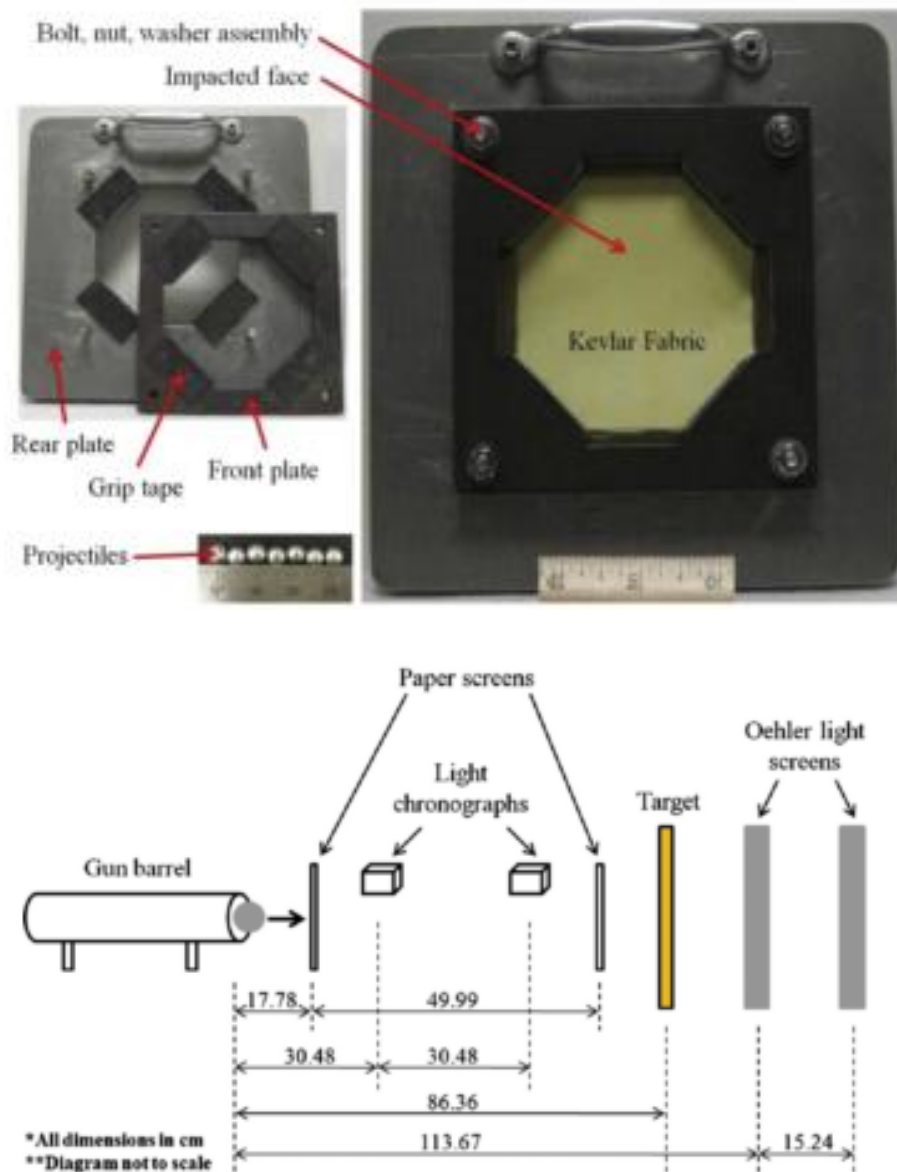


Figura 7: Equipo necesario para llevar a cabo el experimento [18].

La tela quedaba sujeta en sus esquinas, en la dirección al bias¹.

En estas condiciones, se llevaron a cabo 30 disparos a diferentes velocidades para cada tipo de tela (*greige* y *scoured*) cuyos resultados son los arrojados en las siguientes figuras:

¹ Al bias: dirección diagonal.

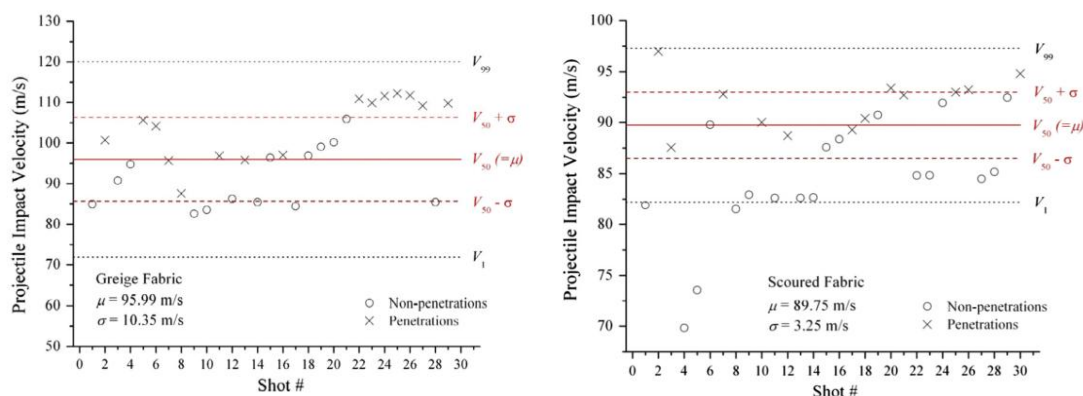


Figura 8: Resultados obtenidos en [18].

Donde V_x es la velocidad de impacto a la cual existe una probabilidad de penetración de X% y μ y σ son la media y la desviación estándar respectivamente. Los resultados arrojan, por tanto, un límite balístico para la muestra de Kevlar *greige* de $V_{50} = 95.99 \text{ m/s}$ y para la muestra de Kevlar *scoured* $V_{50} = 89.75 \text{ m/s}$.

3.2 Simulaciones numéricas

Al igual que ocurría con los ensayos experimentales, actualmente en la literatura científica los modelos numéricos para ensayos balísticos en telas de Kevlar no son muy abundantes. El acercamiento al desarrollo de modelos numéricos capaces de predecir el comportamiento de materiales de defensa balística como el Kevlar frente a impacto, ha sido impedido por la escasez, como ya se ha comentado en el apartado anterior, de ensayos experimentales fiables para poder validar estos modelos. Además, la complejidad de predecir el comportamiento de estas estructuras textiles bajo condiciones de impacto y sus mecanismos de fallo a altas velocidades, han obligado a los investigadores a aceptar ciertas simplificaciones al problema original con el fin de hacerlo más abordable, con costes y tiempos computacionales dentro de unos límites admisibles.

Para presentar algunos de los modelos numéricos existentes actualmente en la literatura científica y que nos han servido para la elaboración de nuestro posterior modelo numérico, cabe diferenciar primero los distintos tipos de escalas de investigación posibles para este tipo de estudios.

Una tela de estructura *woven* puede ser investigada en tres niveles diferentes [19] como se aprecia en la figura siguiente:

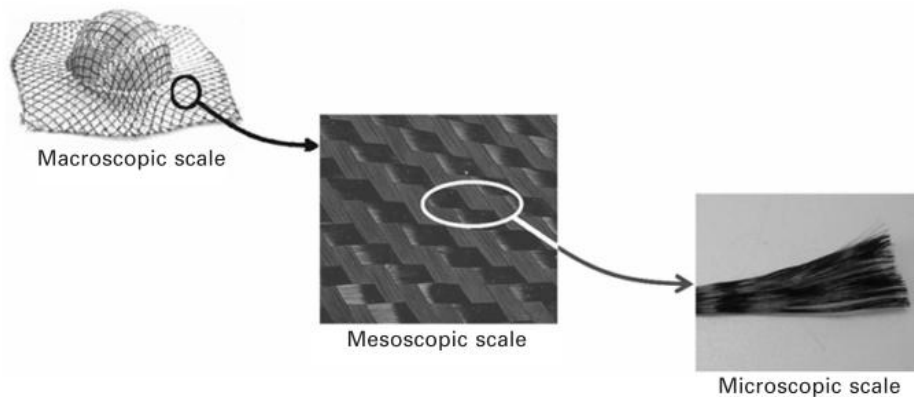


Figura 9: Escalas de estudio de la estructura según [19].

El nivel macroscópico se refiere al nivel del componente entero, con dimensiones del orden de unos pocos centímetros hasta varios metros. A este nivel, la tela puede ser considerada como un material continuo con comportamientos muy específicos, incluyendo una alta anisotropía. Desafortunadamente, no existe en la actualidad un modelo macroscópico comúnmente aceptado que describa con precisión todos los aspectos del comportamiento mecánico de los tejidos textiles *woven*.

En el nivel mesoscópico, la tela es considerada como un entrelazamiento de hilos. Consecuentemente, la escala de trabajo corresponde a la dimensión del hilo, con dimensiones del orden de uno a varios milímetros. Para materiales periódicos, los modelos mesoscópicos consideran el patrón elemental más pequeño, capaz de representar la tela completa en varias traslaciones; este dominio se denomina celda unitaria representativa (RUC). Generalmente cada hilo está modelado como un medio continuo con un comportamiento específico que tiene en cuenta su naturaleza fibrosa a través de una ley constitutiva específica.

Cada hilo está formado por cientos de fibras continuas que interactúan entre ellas, interacción que puede ser estudiada a través del nivel microscópico, donde cada fibra es considerada como una viga 3D que interactúa con el resto de fibras. En este nivel la dimensión característica es de uno a varios micrómetros.

Puesto que existen muy pocos estudios en la actualidad llevados a cabo a nivel microscópico, no vamos a entrar en mayor detalle en él, por lo que clasificaremos los artículos encontrados en macroscópicos y mesoscópicos.

3.2.1 Nivel macroscópico

Para este nivel de estudio, nos podemos encontrar trabajos de distintos tipos. Existen en la literatura científica estudios a nivel macroscópico que modelan la tela como una placa bidimensional, asignándola, en la inmensa mayoría de ellos, un comportamiento elástico

ortótropo² hasta el fallo y, por otra parte, existen estudios que aproximan la placa como un continuo sólido, describiendo el proceso de deformación de la tela debida al impacto mediante un modelo analítico previamente llevado a cabo.

Para el primero de los casos describiremos uno de estos estudios para que quede entendido el método en el que se llevan a cabo este tipo de trabajos. Para el segundo caso hablaremos de la manera en la que se realizan ese tipo de modelos, sin entrar en mayor detalle, puesto que al tratarse de un modelo analítico que requiere de programación para su posterior implementación en programas computacionales de elementos finitos, no va a ser de este estudio.

De la misma manera que con los ensayos experimentales, se ha tratado de buscar entre la literatura más reciente, con el objetivo de encontrar modelos relativamente modernos y novedosos y, en la mayoría de los casos, mejores y más eficientes que los que componen la literatura más antigua.

❖ Numerical analysis of a ballistic impact on textile fabric [20].

En este artículo científico del año 2013, los autores realizan un análisis numérico mediante el método de los elementos finitos con el fin de comprender mejor los fenómenos físicos y mecánicos que ocurren durante un impacto balístico en una tela plana de Kevlar. El estudio compara el comportamiento frente a impacto a varias velocidades de dos modelos bidimensionales, uno macroscópico en el que la tela está modelada en su conjunto como una placa tipo Shell, y otro que, pese a ser clasificado en el artículo de nivel mesoscópico, hemos incluido en esta apartado de estudios a nivel macroscópico por ser también bidimensional, modelando los hilos por separado como placas tipo Shell.

El material empleado en ambos modelos para modelar la tela plana en estructura *woven* es el Kevlar KM2, con una muestra de tamaño $50.6 \times 50.6 \text{ mm}^2$. El comportamiento mecánico de cada hilo es supuesto elástico y ortótropo a lo largo de la línea central del mismo. Para el modelo macroscópico los autores llevan a cabo una serie de simplificaciones que se explicarán a continuación. El proyectil es una esfera de acero, de diámetro 5.35 mm y masa 0.625 g.

De esta manera, los autores escogieron las siguientes propiedades para cada hilo unitario:

ρ [kg/m ³]	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	E_3 [GPa]	G_{12} [GPa]	G_{13} [GPa]	G_{23} [GPa]	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
1310	62	0.62	0.62	0.062	0.062	0.062	0	0	0

Tabla 1: Propiedades de la tela utilizada en [20].

Para el modelo macroscópico, al estar la tela modelada como una placa uniforme, los autores establecieron las propiedades mecánicas de la misma iguales en las direcciones de urdimbre y de trama (1 y 2), considerando por tanto el conjunto como ortótropo y asumiendo el módulo

² Ortótropo: comportamiento elástico de materiales que poseen dos ejes ortogonales entre sí.

de Young en ambas direcciones idéntico e igual al módulo de Young longitudinal de un sólo hilo. El resto de propiedades son las mismas que las del hilo unitario.

Los autores de este estudio asumieron un comportamiento de los hilos elástico hasta el fallo, fijado en un valor de 3.4 GPa, que utilizaron como criterio de fallo de ambos modelos, correspondiente a una deformación del 5.48%. En ambos modelos la tela quedaba fija en dos de sus extremos y establecieron un coeficiente estático de Coulomb de valor $\mu_s = 0.20$ para describir la fricción en el contacto tela-proyectil. Para la fricción entre hilos (modelo mesoscópico) establecieron un coeficiente de valor $\mu_s = 0.23$.

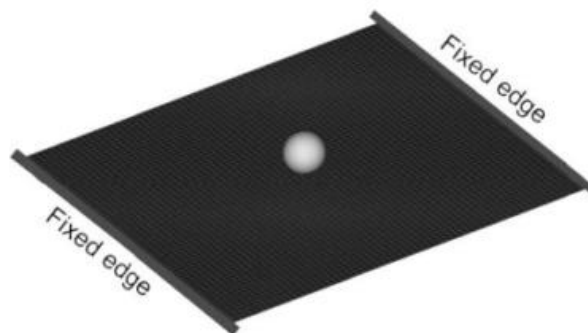


Figura 10: Modelo macroscópico en [20].

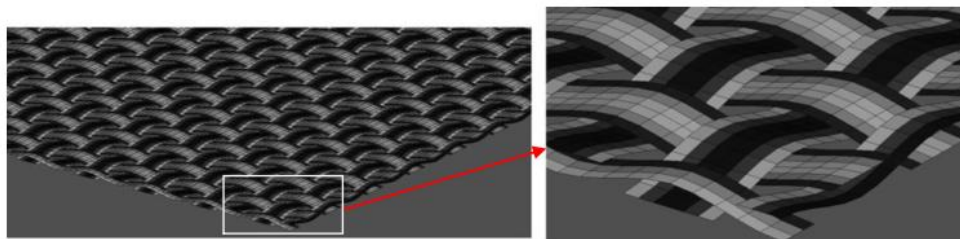


Figura 11: Modelo mesoscópico en [20].

Para ambos modelos, simularon impactos balísticos a velocidades de 60.6, 92.1, 245 [m/s], obteniendo los siguientes resultados para la evolución de la velocidad con respecto al tiempo:

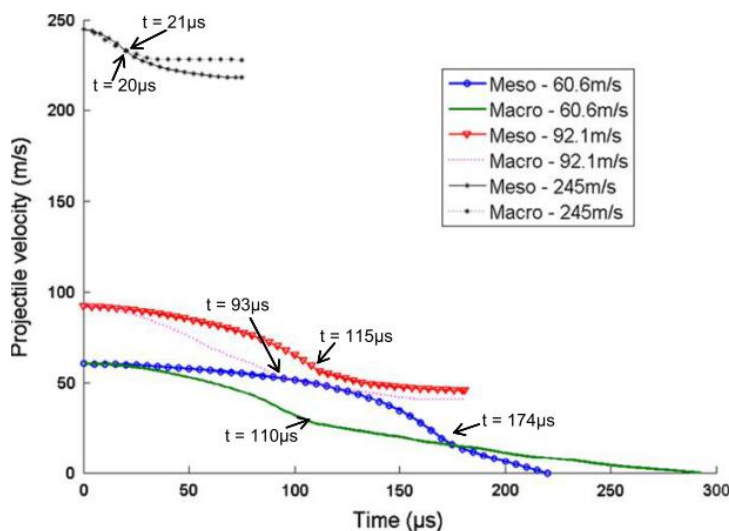


Figura 12: Evolución de la velocidad del proyectil con el tiempo en [20].

Cabe señalar que el programa con el que se llevaron a cabo las simulaciones presentes en este artículo es el LS-Dyna, el cual no funciona exactamente igual ni tiene las mismas opciones y características que el programa Abaqus con el que se llevarán a cabo las simulaciones del presente Trabajo de Fin de Grado, por lo que las posibles diferencias en los resultados obtenidos posteriormente en ambos experimentos son debidas, en parte, a esta cuestión.

❖ Modelos continuos constitutivos.

Una de las aproximaciones más simples para modelar tejidos textiles, es homogeneizar el comportamiento de la mesoestructura subyacente de la tela y aproximarla como un continuo anisótropo. Este tipo de modelos se basan en el hecho de que a una apropiada escala, suficientemente mayor al espaciado entre los hilos, los tejidos *woven* se comportan de forma homogénea y pueden por tanto ser aproximados como un continuo, permitiendo generalmente una eficiencia energética mayor que la de modelos mesoscópicos típicos que modelan cada hilo de la tela por separado. Sin embargo, la mayoría de los modelos continuos tradicionales propuestos en la literatura no tienen en cuenta el efecto de las interacciones entre los hilos.

En la literatura científica podemos encontrar un gran número de modelos analíticos basados en la mesoestructura de las telas que han sido desarrollados para el estudio de estos comportamientos. Estos estudios usan relaciones matemáticas para predecir la respuesta mecánica de la tela y los hilos que la componen en modos específicos de deformación y pueden ser incorporados en formulaciones de continuos anisótropos para producir modelos que sigan la mesoestructura de la tela a medida que el continuo se deforma, combinando de

este modo los beneficios del modelado de continuos con la capacidad de seguir la evolución de la mesoestructura de la tela en un solo paso.

Este tipo de modelos han sido desarrollados por algunos investigadores, dando lugar a estudios como los de King et al. [21] o Parsons et al. [22], donde en cada punto de integración del modelo de elementos finitos, las propiedades del continuo homogeneizado que representa a la tela son determinadas a través de un modelo analítico de deformación de la mesoestructura de la misma. El modelo analítico es una representación tridimensional de la celda unitaria de la tela.

En resumen, este tipo de estudios se basan en una aproximación que depende de la selección de un modelo geométrico para el tejido textil, junto con modelos constitutivos para predecir el comportamiento mecánico de los hilos.

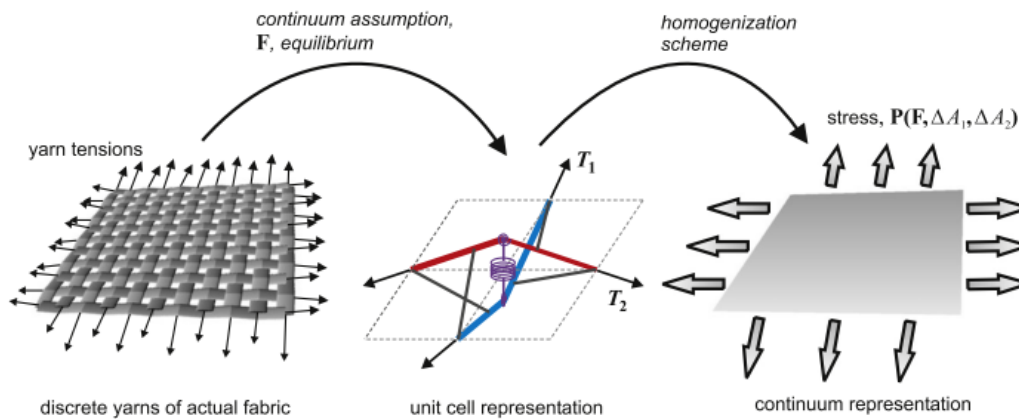


Figura 13: Esquemmatización del desarrollo del modelo constitutivo en [22].

Posteriormente para implementar este modelo analítico en programas computacionales de elementos finitos, los autores emplean subrutinas del material definidas por el usuario con el objeto de poder seguir la deformación de la tela a nivel mesoscópico en casa paso.

3.2.2 Nivel mesoscópico

En este caso, para este nivel de estudio, la mayoría de los trabajos existentes en la literatura son muy parecidos, por lo que describiremos en general cómo se realizan este tipo de modelos y las diferencias que se pueden encontrar respecto a los modelos macroscópicos anteriormente comentados.

Ejemplos de este tipo de estudios son los trabajos de Rao et al. [23] y de Duan et al. [24]. En estos estudios, la tela es modelada como un conjunto de hilos entrelazados en las direcciones de trama y urdimbre. Estos hilos están individualmente modelados como sólidos continuos tridimensionales. El hilo y la tela quedan, por tanto, como se puede ver en la siguiente figura:

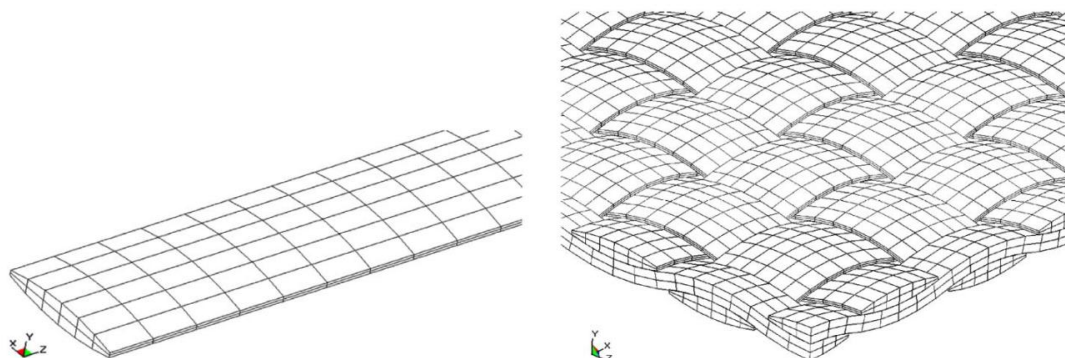


Figura 14: Modelo mesoscópico en [24].

En ambos estudios, así como en la mayoría de los presentes en la literatura científica, se asume que los hilos tienen un comportamiento elástico ortótropo. En Duan et al. [24] se indica, coincidiendo con trabajos anteriores, que un continuo elástico ortótropo tridimensional se comporta mecánicamente como un hilo si sus coeficientes de Poisson son cero y los módulos trasversales y de cortadura son muy pequeños con respecto al longitudinal. En Rao et al. [23], se concreta más, afirmando que en este tipo de estudios se puede asumir un comportamiento mecánico de los hilos trasversalmente isótropo³, donde los módulos trasversales y de cortadura tienen un valor de dos y tres órdenes menores al módulo longitudinal respectivamente, siendo los coeficientes de Poisson iguales a 0.

En todos estos estudios, el criterio de fallo empleado para las simulaciones es el de tensión principal máxima, tensión a partir de la cual se produce el fallo de los hilos y se borra el respectivo elemento de la malla de elementos finitos. Cabe destacar que todos estos estudios están modelados en el código comercial de elementos finitos LS-Dyna.

Este tipo de estudios, en comparación con los estudios macroscópicos en los que la tela se modelaba como una placa continua, al estar modelados a nivel del hilo, permiten predecir con mayor precisión los modos de fallo de la tela. Además, permiten tener en cuenta factores como el movimiento relativo y la fricción entre hilos, factores que ha sido demostrado en diversos estudios [25], [26] que tienen importancia en el comportamiento de la tela frente a impacto balístico y que no son tenidos en cuenta en los estudios macroscópicos, produciendo, por tanto, unos resultados más precisos que los que arrojan los estudios macroscópicos.

Como aspecto negativo, cabe decir que estos estudios mesoscópicos que modelan la tela a nivel tridimensional, son computacionalmente menos eficientes que los macroscópicos, necesitando de periodos de tiempo excesivamente largos para llevar a cabo las simulaciones.

³ Transversalmente isótropo: caso particular de comportamiento elástico ortótropo en el que existe una dirección preferente o longitudinal y todas las secciones perpendiculares a la misma son mecánicamente equivalentes.

3.2.3 Modelos multiescala

Aunque no vamos a entrar en mucho detalle, existen en la literatura científica estudios que combinan en el mismo modelo los dos tipos de escala comentados anteriormente.

Este tipo de estudios presenta las ventajas de los modelos mesoscópicos en los que el modelo se realiza, en determinadas zonas, al nivel de resolución del hilo, proporcionando resultados fiables y muy próximos a la realidad, con las ventajas de los modelos macroscópicos capaces de minimizar el coste computacional.

Algunos ejemplos de trabajos que emplean este método son [27], [28] o [29]. Estos artículos presentan en sus modelos, por tanto, dos zonas de estudio en la tela:

- Zona a escala mesoscópica: comprende la zona de la tela donde se produce el impacto del proyectil y los alrededores de la misma. En esta zona la tela se presenta mediante hilos entrelazados modelados como continuos tridimensionales, con el objeto de poder estudiar con mayor precisión los sucesos que ocurren durante el impacto así como los modos de fallo de la tela.
- Zona a escala macroscópica: comprende el resto de la tela y se modela mediante una placa continua. A medida que nos alejamos en la tela de la zona de impacto, el nivel de interacciones entre los hilos y entre el proyectil y la tela decrece considerablemente, por lo que resulta innecesario modelar toda la tela a nivel mesoscópico.

En algunos de estos estudios, como en [28], la zona mesoscópica también abarca el área donde se encuentran los hilos principales, desde el centro (zona de impacto) hasta el extremo de la tela, con el fin de poder analizar mejor los mecanismos de daño de la tela así como el comportamiento de los hilos principales durante el impacto. En otros estudios, como en [29], los autores emplean tres zonas de estudio, siendo la zona de los hilos principales la zona de escala intermedia, modelándolos como elementos bidimensionales tipo Shell.

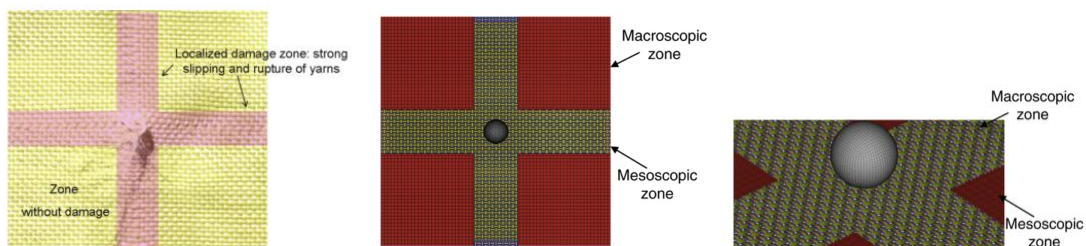


Figura 15: Estructura del modelo multiescala en [28].



4 ANÁLISIS NUMÉRICO

4.1 Método de los elementos finitos

Este método, que en sus orígenes iba invariablemente asociado a la resolución de problemas de ingeniería estructural, es hoy en día un referente para numerosas disciplinas en muchos campos, estando su ámbito extendido a todas las áreas de la mecánica clásica, con aplicaciones a prácticamente todos los problemas en ingeniería. En nuestro problema en particular, la mayoría de los modelos presentados, tanto analítica como computacionalmente, están basados en él, es por ello que en el presente apartado procedemos a explicar, sin entrar en excesivo detalle, cómo se produjo la aparición del método así como el funcionamiento y principales rasgos del mismo.

Las limitaciones de la mente humana son tales que no pueden captar el comportamiento del complejo mundo que la rodea en una sola operación global. Por ello, una forma natural de proceder de ingenieros, científicos y economistas consiste en separar los sistemas en sus componentes individuales o "elementos", cuyo comportamiento pueda conocerse sin dificultad y, posteriormente, reconstruir el problema original para estudiarlo a partir de dichos componentes.

En muchos casos se obtiene un modelo adecuado utilizando un número finito de componentes bien definidos. A tales problemas se les llama discretos. En otros, la subdivisión prosigue indefinidamente y el problema sólo puede definirse haciendo uso de la ficción matemática de infinitésimo, lo cual nos conduce a ecuaciones diferenciales o expresiones equivalentes con un número infinito de elementos implicados. A estos problemas se les llama continuos.

Gracias a la llegada de los ordenadores digitales, los problemas discretos pueden resolverse generalmente sin dificultad, sea cual sea el número de elementos. Sin embargo, como la capacidad de los ordenadores es finita, los problemas continuos sólo se pueden resolver de forma exacta mediante manipulaciones matemáticas. Las técnicas matemáticas disponibles para obtener soluciones exactas suelen limitar las posibilidades a casos extremadamente simplificados.

Para vencer la dificultad que presenta la solución de problemas continuos reales, ingenieros, científicos y matemáticos han ido proponiendo a través de los años diversos modos de discretización. La aplicación de estos métodos hace necesario efectuar alguna aproximación de tal manera que quepa esperar que la misma se acerque, en el límite, a la solución continua verdadera a medida que crezca el número de variables discretas.

Cabe decir que esta discretización de problemas continuos ha sido abordada de manera diferente por matemáticos e ingenieros. Los primeros han desarrollado técnicas generales aplicables directamente a las ecuaciones diferenciales que rigen el problema, tales como aproximaciones por diferencias finitas, diferentes métodos de residuos ponderados o técnicas aproximadas, para determinar puntos estacionarios de "funcionales" definidos en forma apropiada. Los ingenieros, sin embargo, suelen enfrentarse al problema de forma más

intuitiva, creando una analogía entre elementos discretos reales y porciones finitas de un dominio continuo. De esta posición de "analogía directa" fue de donde nació la expresión de "elemento finito".

Todos los análisis que se han ido desarrollando con el transcurso de los años para analizar problemas de naturaleza discreta siguen un patrón general que puede adaptarse universalmente a todos los sistemas discretos. Esta existencia de una manera única para abordar los problemas discretos tipo nos lleva a la primera definición del método de los elementos finitos como procedimiento de aproximación de problemas continuos, de tal forma que:

- a) el continuo se divide en un número finito de partes (elementos), cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros y
- b) la solución del sistema completo como ensamblaje de los elementos sigue precisamente las mismas reglas que se aplican a los problemas discretos tipo.

Este método de los elementos finitos está pensado principalmente para ser usado en sistemas computacionales. En el problema que nos concierne, problema propio de mecánica de medios continuos, el análisis de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente.

Cualquier programa computacional que utiliza el método de elementos finitos, convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema en forma matricial que proporciona el resultado correcto para un número finito de puntos e interpola posteriormente la solución al resto del dominio, resultando finalmente sólo una solución aproximada. El conjunto de puntos donde la solución es exacta se denominan nodos. Dicho conjunto de nodos forma una red, denominada malla, formada por retículos. Cada uno de los retículos contenidos en dicha malla es un "elemento finito". El conjunto de nodos se obtiene dividiendo o discretizando la estructura en elementos de forma variada (pueden ser superficies, volúmenes y barras).

De esta manera, las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa que usa el método de los elementos finitos se dividen en:

- **Preproceso:** definición de geometría, generación de la malla, condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales y otras propiedades. En ocasiones existen operaciones cosméticas de regularización de la malla y preacondicionamiento para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.
- **Procesamiento:** el resultado del preproceso, en un problema simple no-dependiente del tiempo, permite generar un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema es no lineal o dependiente del tiempo a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben

resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.

- **Postproceso:** el cálculo proporciona valores de cierto conjunto de funciones en los nodos de la malla que define la discretización, en el postproceso se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

En la actualidad existen numerosos programas computacionales del método de los elementos finitos: Ansys, LS-Dyna, Abaqus, Inventor, Flux... En el presente proyecto usaremos el programa Abaqus, cuya estructura de programa y funcionamiento se describe a continuación.

4.1.1 Abaqus

Como ya hemos comentado, se trata de un código comercial que aplica el método de los elementos finitos para realizar cálculos estructurales estáticos lineales y no lineales, y dinámicos incluyendo una gran variedad de posibles simulaciones y problemas.

Para la definición, procesamiento y posterior visualización de resultados de un problema en Abaqus, éste consta de diversos módulos, los cuales se pueden estructurar en las etapas de un análisis con el método de los elementos finitos de la siguiente manera:

- **Preproceso.** El preproceso en Abaqus se realiza mediante la aplicación gráfica ABAQUS CAE y comprende los siguientes módulos:
 - Part: módulo en el que se diseña y modela la geometría de las distintas piezas que componen el problema.
 - Property: en él se crean los materiales, con sus respectivos comportamientos elastoplásticos y criterios de fallo, que se asignarán a las partes anteriormente creadas.
 - Assembly: en este módulo se juntan las piezas creadas anteriormente formando la geometría inicial del problema.
 - Step: aquí se procede a la elección del tipo de problema (estático, dinámico...) así como se establece el tiempo de duración del mismo.
 - Interaction: módulo en el que se establecen las interacciones entre las distintas partes creadas.
 - Load: en este módulo se establecen las condiciones de contorno y las cargas del problema.
 - Mesh: en él, se procede a discretizar el problema creando una malla de elementos finitos.
 - Job: este es el último módulo, en el que creamos el archivo que contiene al modelo y lo lanzamos al procesador.

- **Procesamiento.** En este paso se resuelven las ecuaciones según el modelo que se ha planteado en el preproceso. Para ello, Abaqus realiza el ensamblado de la matriz de rigidez y resuelve el sistema de ecuaciones algebraicas a partir de dicha matriz y del vector de cargas.
- **Postproceso.** Es la fase final, en la que se pueden visualizar los resultados, se lleva a cabo mediante la aplicación gráfica ABAQUS VIEWER.
 - Visualization.

4.2 Desarrollo del modelo numérico

En este apartado se describe en profundidad la manera en que se ha llevado a cabo el desarrollo del modelo creado. Para este modelo, se barajaron en un principio varias alternativas sobre la magnitud de estudio del mismo, teniendo en cuenta los existentes en la literatura científica:

- Modelo mesoscópico tridimensional.** Modelo a nivel del hilo, modelándolos por separado mediante elementos tridimensionales.
- Modelo mesoscópico bidimensional.** Modelo a nivel del hilo, pero modelándolos esta vez como elementos bidimensionales.
- Modelo macroscópico.** Modelo a nivel de la tela, modelándola como un conjunto.

En un primer momento se optó por la opción A (modelo mesoscópico tridimensional), modelo capaz de tener en cuenta más factores que un modelo macroscópico, como pueden ser las interacciones y la fricción entre los hilos que forman la tela y que, probablemente ofrecería unos resultados más ajustados a la realidad. Sin embargo, teniendo en cuenta el coste computacional que conlleva este tipo de estudios, debido a la magnitud del problema y al excesivamente elevado número de elementos y nodos que tendría el modelo, lo que produciría tiempos de simulación desorbitados, y teniendo en cuenta los estudios planteados inicialmente que conllevarían un muy elevado número de simulaciones que habría que realizar, se decidió descartar esta opción.

Entre las dos opciones restantes, basándonos en los estudios llevados a cabo en [20], en los que se comparan los resultados proporcionados por estos dos tipos de modelo y ofrecen ambos unos resultados similares, se decidió optar por el modelo macroscópico (opción C), ya que conllevaría un coste computacional ampliamente menor, ofreciendo unos resultados prácticamente idénticos.

Para describir este modelo macroscópico, antes de entrar en profundidad en el propio modelo y las características que tiene, deben explicarse algunos de los conceptos y características propias del programa Abaqus para la modelización de este tipo de problemas y que se han empleado durante la creación y el desarrollo del modelo.

4.2.1 Concepto de "Lamina"

Para cualquier material con un comportamiento elástico lineal, la relación entre tensión y deformación queda definida de la siguiente manera:

$$\sigma = D^{el} \varepsilon^{el}$$

, donde σ es la tensión total, D^{el} es el tensor de elasticidad de cuarto orden y ε^{el} es la deformación elástica total.

Dependiendo del número de planos de simetría para las propiedades elásticas, se pueden clasificar los materiales como isótropos (un número infinito de planos de simetría pasando por cualquier punto), o anisótropos (ningún plano de simetría). Algunos materiales, en cambio, tienen un número determinado de planos de simetría pasando por cualquier punto, como es el caso de los materiales ortótropos, los cuales tienen dos planos ortogonales de simetría para las propiedades elásticas, como ya comentamos anteriormente. El número de componentes independientes del tensor de elasticidad D^{el} depende de esas propiedades de simetría. Además, los materiales lineales elásticos deben satisfacer las condiciones de estabilidad de Drucker, que requiere que el tensor D^{el} sea definido positivo, lo que lleva a la existencia de ciertas restricciones en los valores de las constantes elásticas.

Para nuestro modelo, hemos seguido las suposiciones de [5], donde se establece que el comportamiento mecánico de un tejido textil se puede modelar en Abaqus como "Lamina", un comportamiento mecánico lineal elástico y ortótropo aplicado a tensión plana. Sabemos, como comentamos anteriormente y vimos en el capítulo de Trabajos Anteriores, que los tejidos textiles *woven* tienen un comportamiento que se puede asemejar al de un material ortótropo y, además, sabemos que las fibras de Kevlar tienen un comportamiento lineal elástico hasta el fallo.

Todo ello, añadido al hecho de que nuestro modelo es bidimensional, hace que podamos considerar las suposiciones de este artículo como válidas y aplicables a nuestro modelo.

Para este tipo de modelos ("Lamina"), sólo son necesarios los valores de $E_1, E_2, G_{12}, G_{13}, G_{23}, \nu_{12}$, para definir el comportamiento elástico ortótropo del material, siendo las direcciones 1 y 2 las que forman la superficie de tensión plana. De esta manera, la relación tensión-deformación queda como sigue:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

Y las condiciones de estabilidad son las siguientes:

$$E_1, E_2, G_{12}, G_{13}, G_{23} > 0$$

$$|v_{12}| < (E_1/E_2)^{1/2}$$

4.2.2 Teorías de fallo

Existen en Abaqus diversas teorías que se encargan de describir el proceso de fallo de un material, desde la identificación de la rotura, hasta la evolución de la misma. Sin embargo, entre estas teorías de fallo no se encuentra ninguna propia de tejidos textiles.

La relativa proximidad de las telas al comportamiento mecánico de los materiales compuestos (ambos son materiales reforzados por fibras, aunque las telas sin material matriz), hace que alguna de las teorías de fallo propias de los materiales compuestos puedan ser aplicables también a los tejidos textiles. Se consideran, por tanto, las siguientes teorías de fallo existentes en Abaqus aplicables a tejidos textiles:

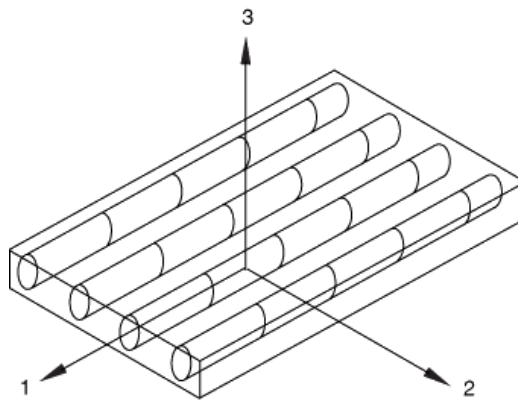


Figura 16: Sistema de referencia donde 1 es la dirección longitudinal de la fibra (hilo) y 2 es la dirección transversal [30].

- **Tensión máxima:** compara cada componente de la tensión con su correspondiente tensión máxima. El fallo, por tanto, se alcanza cuando se llega a esta tensión máxima.

$$I_f = \max\left(\frac{\sigma_{11}}{X}, \frac{\sigma_{22}}{Y}, \left|\frac{\sigma_{12}}{S}\right|\right) < 1$$

Donde X_t, X_c, Y_t, Y_c son las tensiones últimas a tracción (t) y compresión (c) en las direcciones 1 (X) y 2 (Y) y S es la tensión máxima de cizalla en el plano 12 (XY).

Cabe destacar que este modelo no proporciona interacción entre componentes de la tensión en las diferentes direcciones, por lo que no tiene demasiada precisión.

- **Deformación máxima:** compara cada componente de la deformación con su correspondiente deformación máxima. El fallo, por tanto, se alcanza cuando se llega a esta deformación máxima.

$$I_f = \max\left(\frac{\varepsilon_{11}}{X_\varepsilon}, \frac{\varepsilon_{22}}{Y_\varepsilon}, \left|\frac{\varepsilon_{12}}{S_\varepsilon}\right|\right) < 1$$

Donde $X_{\varepsilon t}, X_{\varepsilon c}, Y_{\varepsilon t}, Y_{\varepsilon c}$ son las deformaciones últimas a tracción (t) y compresión (c) en las direcciones 1 (X) y 2 (Y) y S es la tensión máxima de cizalla en el plano 12 (XY).

Al igual que ocurre con el modelo de tensión máxima, no tiene demasiada precisión.

- **Criterio de Hashin:** este criterio a diferencia de los anteriores, considera, no sólo el momento en el que se produce la iniciación del fallo (punto A de la siguiente figura), sino también la evolución del mismo (tramo AB). Las teorías anteriores, consideraban únicamente la primera arista del "triángulo" que forma la respuesta del fallo, capturando así el momento en el que se produce la iniciación del fallo (A), pero siendo incapaces de seguir la evolución del mismo y, por tanto, siendo incapaces de eliminar el elemento (punto B) de la malla una vez se produce su fallo. Esto se explicará en mayor profundidad en los siguientes subapartados.

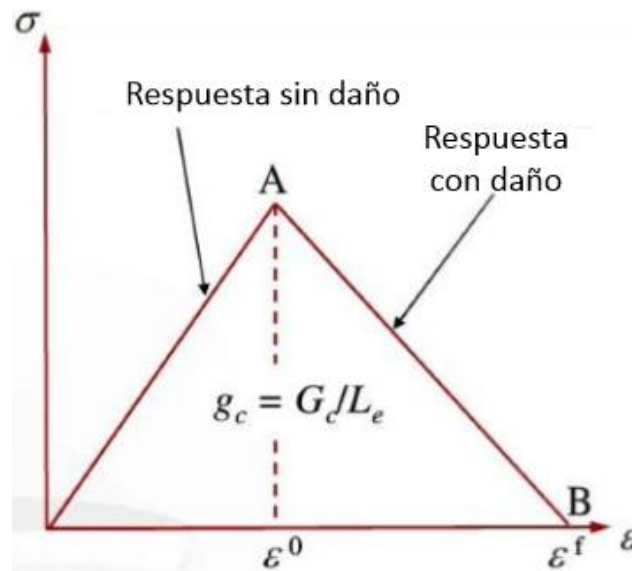


Figura 17: Representación gráfica del desarrollo del daño en Abaqus según [31].

Este criterio contempla cuatro modos de fallo diferentes:

- Fallo de fibras a tracción ($\hat{\sigma}_{11} \geq 0$):

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 \geq 1$$

- Fallo de fibras a compresión ($\hat{\sigma}_{11} < 0$):

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 \geq 1$$

- Fallo de la matriz a tracción ($\hat{\sigma}_{22} \geq 0$):

$$F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 \geq 1$$

- Fallo de la matriz a compresión ($\hat{\sigma}_{22} < 0$):

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S}\right)^2 - 1\right] \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right) + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 \geq 1$$

Para comprender mejor este modo de fallo del material, así como la manera en que funciona el programa Abaqus durante el fallo de un material por el criterio de Hashin, se procede a explicar con mayor profundidad el inicio y evolución del daño.

4.2.2.1 Iniciación del daño

La iniciación del daño se refiere al comienzo de la degradación en un punto material. En Abaqus, el inicio del daño está determinado por el criterio de iniciación propuesto por Hashin y Rotem [32] y Hashin [33]. Estos criterios consideran los 4 mecanismos diferentes de iniciación del daño señalados en el apartado anterior: tracción de las fibras, compresión de las fibras, tracción de la matriz y compresión de la matriz.

Para evaluar el criterio de iniciación del daño se utiliza $\hat{\sigma}$, siendo:

$$\hat{\sigma} = M\sigma$$

donde σ es la tensión verdadera y M es el operador del daño, el cual viene dado por:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_f)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_s)} \end{bmatrix}$$

donde d_f, d_m, d_s son variables de daño internas que caracterizan el daño de la fibra, matriz y cortadura respectivamente, las cuales se derivan de las variables de daño $d_f^t, d_f^c, d_m^t, d_m^c$ correspondientes a los cuatro mecanismos de fallo comentados anteriormente de la siguiente manera:

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \text{si } \hat{\sigma}_{11} \geq 0 \\ d_f^c & \text{si } \hat{\sigma}_{11} < 0 \end{cases}$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \text{si } \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \\ d_m^c & \text{si } \hat{\sigma}_{22} < 0 \end{cases}$$

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c)$$

Antes de cualquier inicio y evolución del daño, el operador del daño, M es igual a la matriz identidad, de manera que $\hat{\sigma} = \sigma$. Una vez que ocurre en al menos un modo el inicio del daño y su evolución, el operador del daño se vuelve más significativo en el criterio de inicio del daño de los otros modos. La tensión efectiva $\hat{\sigma}$ es la que representa la tensión que actúa sobre el área dañada que efectivamente resiste las fuerzas internas.

Para definir el criterio de iniciación del daño se introduce el valor de las variables $X^t, X^c, Y^t, Y^c, S^t, S^c$, las cuales son propiedad del material y representan las resistencias del material en sentido longitudinal (X) y transversal (Y) a tracción y a compresión, y la resistencia de cortadura (S) en sentido longitudinal y transversal.

4.2.2.2 Evolución del daño y eliminación de elementos

Antes de la iniciación del daño el material es linealmente elástico, con la matriz de rigidez propia de un material ortótropo en tensión plana. Por tanto, la respuesta del material se computa de:

$$\sigma = C_d \varepsilon$$

, donde C_d es la matriz de elasticidad que refleja cualquier daño y tiene la forma:

$$C_d = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} (1 - d_f)E_1 & (1 - d_f)(1 - d_m)v_{21}E_1 & 0 \\ (1 - d_f)(1 - d_m)v_{12}E_2 & (1 - d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - d_s)GD \end{bmatrix}$$

, donde $D = 1 - (1 - d_f)(1 - d_m)v_{12}E_2$, d_f refleja el estado actual del daño en la fibra, d_m refleja el estado actual del daño en la matriz y d_s refleja el estado actual del daño de cortadura, variables que derivan de $d_f^t, d_f^c, d_m^t, d_m^c$, como se comentó anteriormente. E_1, E_2 son los módulos de Young en las direcciones de la fibra y de la matriz respectivamente, G es el módulo de cortadura y v_{12}, v_{21} son los coeficientes de Poisson.

Para paliar la dependencia de la malla durante el ablandamiento del material, Abaqus introduce una longitud característica en la formulación, de manera que la ley constitutiva está expresada como una relación tensión-deformación. La variable del daño evolucionará de manera que la relación tensión-desplazamiento se comporta como se muestra en la siguiente figura en cada uno de los cuatro modos de fallo.

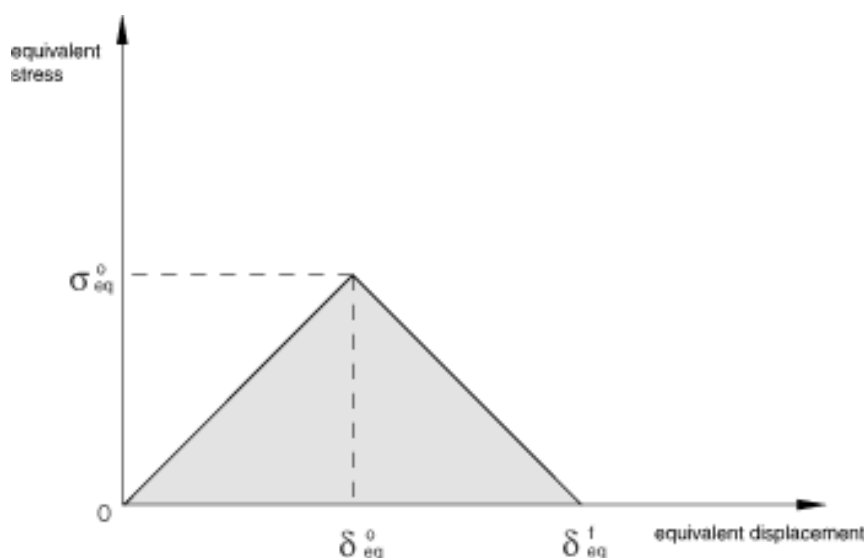


Figura 18: Representación del desarrollo del daño de los elementos del modelo en Abaqus según [34].

La longitud característica L_c está basada en la geometría y la formulación del elemento. En el caso de elementos tipo Shell como los que tiene el modelo que se presenta en este proyecto, la longitud característica es la longitud de la superficie de referencia, calculada como la raíz cuadrada del área .

Para cada modo de fallo se debe especificar la energía disipada debido al fallo, G , que corresponde con el área bajo la curva de la figura anterior, es decir, el área del triángulo. Para definir el comportamiento de la evolución del daño (*Damage Evolution*) en Abaqus se deben especificar las energías de rotura por tracción y compresión en dirección longitudinal, G_{ft}, G_{fc} y las energías de rotura por tracción y compresión en dirección transversal, G_{mt}, G_{mc} . De esta manera, la expresión para la evolución de cada daño es la siguiente:

$$G = \text{Área} = \frac{X^2}{E} \cdot L_c \quad (\text{Expresión 1})$$

donde X es la resistencia del material, que será X^t, X^c, Y^t, Y^c , dependiendo del tipo de daño, E es el módulo de Young el cual será E_1, E_2 dependiendo del sentido (longitudinal o transversal) y L_c es la longitud característica.

En Abaqus, un punto material falla cuando cualquiera de las variables asociadas con los modos de fallo de la fibra alcanza su valor máximo y el elemento es eliminado de la malla cuando esta condición se satisface para todos los puntos de integración de un mismo punto de la sección. En nuestro caso, una tela modelada por una placa tipo Shell, el elemento será eliminado cuando se cumple esta condición para todos los puntos de integración a lo largo del espesor de un mismo punto de la malla.

4.2.3 Creación del modelo

Para la creación de nuestro modelo bidimensional a validar, como hemos señalado anteriormente, hemos utilizado las simplificaciones hechas en [5] para modelar tejidos textiles secos planos elásticos lineales. En este artículo se establece que para que una placa tipo Shell se comporte como un tejido textil, su módulo de Young en las direcciones 1 y 2 de la tela debe ser igual a su módulo de Young longitudinal, su coeficiente de Poisson (ν_{12}) debe ser 0 y sus módulos de cizalladura en todas las direcciones (G_{12}, G_{13}, G_{23}), deben ser muy pequeños con respecto al módulo de Young (0.001E).

Para las condiciones del problema y el valor de las propiedades de las telas antes citadas, así como de las del proyectil, hemos tomado como referencia el artículo [20]. Además, para los valores de las propiedades de la tela, hemos usado las suposiciones de Rao et al. en [23] para nuestro modelo tipo Shell, donde se afirma que en este tipo de modelos numéricos, la densidad del hilo debe ser establecida menor a la densidad de fibra del Kevlar KM2 (1440 kg/m^3), ya que un hilo de fibras circulares ajustadas lo máximo posible entre ellas crea un ratio de empaquetamiento de 0.91. Nuestro modelo es macroscópico, no está modelado al nivel del hilo, sin embargo, se acerca más a este tipo de modelos (mesoscópicos) que a los modelos hechos a nivel de la fibra (microscópicos), por lo que debemos tomar esta suposición para ajustar mejor los resultados a la realidad. En este mismo artículo, además, se indica también que el módulo de Young longitudinal es significativamente mayor a los módulos de cortadura, siendo éstos de tres magnitudes inferiores y los módulos de Poisson muy cercanos a 0 (supuestos 0 por simplicidad), tal y como tomaremos nosotros en nuestro modelo.

De esta manera, nuestro modelo queda como sigue:

➤ Partes

- Proyectil.

El proyectil utilizado es una bala esférica de acero del calibre 0.22. Como en este estudio lo único que nos interesa del proyectil es su velocidad, tanto antes del impacto, como tras él, se ha decidido, por simplicidad, modelarlo como un sólido rígido discreto (*Discrete Rigid*), de manera que no sufre deformaciones y no precisa de una malla demasiado sensible. Para modelarlo de esta manera, únicamente necesitamos introducir las siguientes propiedades:

Geometría (esfera)	Masa
d = 5.35 mm	0.625 g

Tabla 2: Propiedades del proyectil utilizado.

- Tela.

La tela utilizada es una muestra cuadrada de $50.6 \times 50.6 \text{ mm}^2$ de 0.23 mm de espesor de Kevlar KM2, cuyas propiedades se indican en la siguiente tabla:

$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$E_1 \text{ (GPa)}$	$E_2 \text{ (GPa)}$	$G_{12} \text{ (GPa)}$	$G_{13} \text{ (GPa)}$	$G_{23} \text{ (GPa)}$	ν_{12}
1310	62	62	0.062	0.062	0.062	0

Tabla 3. Propiedades de la tela utilizada.

El criterio de fallo utilizado es, como se indicó en apartados anteriores, el criterio de Hashin, cuyos valores de resistencia máxima se han cogido de la literatura científica y los valores de la evolución del daño (*Damage Evolution*) se han establecido siguiendo la Expresión 1.

La distancia inicial entre el proyectil y la tela es de 0.5mm, con objeto de que el impacto se produzca lo antes posible para, así, minimizar el coste computacional del modelo. Por la misma razón, el tiempo de duración de la simulación (*step time*) se ha cogido de 0.0002 s, tiempo que, en apartados posteriores, se variará en función de la velocidad de impacto del proyectil.

➤ Condiciones de contorno y contacto

La tela está sujeta por dos de sus laterales, en los que se ha aplicado un empotramiento, restringiendo, de esta manera, tanto los desplazamientos como los giros en los mismos. Además, en el proyectil, con objeto de que no haya pérdida alguna de velocidad durante y tras el impacto, se ha restringido el movimiento del proyectil a una única dirección, la dirección del movimiento del mismo hacia la tela, perpendicular a ésta.

En cuanto al contacto, en un principio se barajaron dos opciones para definir el contacto entre tela y proyectil:

- A. Contacto general (*General Contact*): de esta manera se define un contacto entre todas las partes presentes en el ensamblaje (en este caso únicamente la tela y el proyectil).
- B. Superficie contra superficie (*Surface-to-surface*): en este caso se establece un contacto de una superficie contra otra. Este tipo de contacto necesita de un coeficiente de fricción entre las dos superficies.

Al sólo tener dos partes en el problema (tela y proyectil), se ha optado por utilizar el contacto superficie contra superficie, que además tiene en cuenta el valor de la fricción entre el proyectil de acero y la tela, valor que se ha demostrado en numerosos artículos como [35] y [36] que tiene influencia en el comportamiento de la tela frente a impacto balístico. Por tanto, se ha establecido un contacto entre la superficie del proyectil, y la cara de la tela por la que impacta el proyectil, con un valor para el comportamiento tangencial del mismo de 0.2, tomado de la literatura científica. Para el comportamiento normal se ha establecido un "*hard contact*".

➤ Mallado

Para el mallado de la tela se han utilizado, siguiendo con las indicaciones de [5], elementos S4R, con una longitud característica de 0.3 mm, suficiente para proporcionar unos resultados adecuados con un coste computacional aceptable.

En el caso del proyectil, como no sufre deformaciones y el único parámetro que vamos a medir en él es el de la velocidad, se ha utilizado un tamaño de malla lo suficientemente pequeño para conservar la forma del proyectil y optimizar, así, el coste computacional.

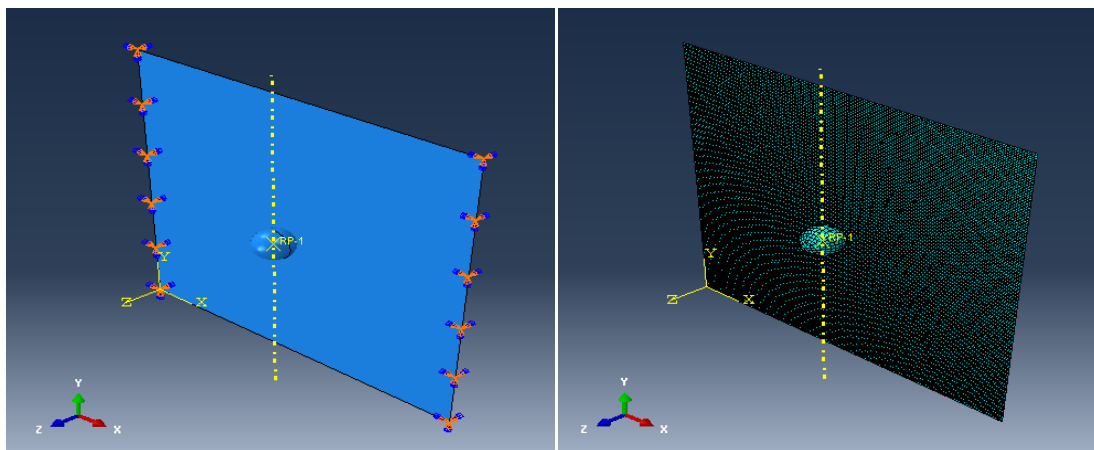


Figura 19: Imágenes del ensamblaje con las condiciones de contorno y mallado del modelo.

4.2.4 Validación del modelo

Para la validación del modelo, hemos realizado ensayos de impacto con las mismas condiciones de contorno y a las mismas velocidades que los realizados en [20] (simulaciones numéricas) y en [37] (ensayos experimentales).

Para ello, con las condiciones del problema anteriormente descritas, se han llevado a cabo simulaciones de impacto a 60.6, 92.1, 245 m/s . Se ha decidido llevar a cabo la validación del modelo con estos artículos puesto que utilizan el mismo tipo de Kevlar para sus telas, y además, los impactos son a distintas velocidades que nos permiten observar el comportamiento de la tela a impactos no penetrantes y a otros que sí lo consiguen. Además, podemos comparar nuestros resultados con modelos macroscópicos, mesoscópicos así como con ensayos experimentales. Los resultados obtenidos son los siguientes:

V_i	V_r (macro)	V_r (meso)	V_r (exp)	V_r
60.6	0	0	0	0
92.1	38	45	-	18.3
245	226	218.1	207	207.9

Tabla 4: Comparativa de resultados.

Todos los valores introducidos se encuentran en unidades del SI, en este caso, (m/s). En el ensayo experimental, pese a que se llevan a cabo impactos a muchas velocidades, únicamente se muestran en el artículo resultados para 60.6 y 245 (m/s).

Otro de los parámetros que debemos tener en cuenta a la hora de validar el modelo es el del límite balístico. Según se indica en [37], el límite balístico se encuentra entre 63 y 92 m/s, se indica en el artículo que no se puede saber con precisión el valor de este parámetro ya que no se llevaron a cabo impactos entre estos dos valores de velocidad. En cuanto a [20], tampoco se da con exactitud el valor de este parámetro, pero por lo que podemos apreciar de los resultados obtenidos, se puede asegurar que este valor se encontrará entre 60.6 y 92.1, límites prácticamente idénticos a los del ensayo experimental. Por último, en cuanto a los resultados obtenidos en nuestro modelo, el límite balístico se encuentra en el mismo rango que los anteriores y, además podemos afirmar, debido a la baja velocidad residual del impacto, que se encuentra próximo a 92.1, muy parecido también a los resultados obtenidos en [18].

4.2.5 Conclusiones

Tras observar y analizar los resultados obtenidos en el apartado de validación del modelo, podemos afirmar que estos resultados obtenidos se aproximan bastante a los de los ensayos existentes en la literatura con los que se ha comparado nuestro modelo. Podemos declarar, por tanto, el modelo como validado, y pasar a realizar varios estudios con él.

Las pequeñas diferencias obtenidas en los resultados (valores en la velocidad residual) pueden ser debidas a numerosos factores, entre los que dominan las diferencias entre nuestro modelo y los modelos presentados en [20]. Recordemos que nuestro modelo era un modelo macroscópico donde la tela se modelaba como una placa, mientras que en los modelos presentes en el artículo anterior, uno era parecido al nuestro donde la tela se modela como una placa, y el otro era un modelo mesoscópico donde se modelaban los hilos por separado. También juega especial importancia en estas diferencias obtenidas, el distinto criterio de fallo escogido para la tela, así como el hecho de que los ensayos del artículo, y el que se lleva a cabo en el presente documento, están llevados a cabo en códigos comerciales distintos de elementos finitos.

Con todo ello, estas diferencias en los resultados se han considerado despreciables frente a las semejanzas que presentan. En los próximos apartados, con el modelo ya validado, se estudiará a fondo el efecto que tiene el número de capas, la geometría del proyectil y las condiciones de contorno en el comportamiento balístico de la tela.

4.3 Efecto del número de capas

Como ya se ha comentado en numerosas ocasiones anteriormente, este documento se centra en las aplicaciones de defensa balística que tienen los tejidos textiles *woven* formados por fibras resistentes como el Kevlar. En estas aplicaciones, es de vital importancia el estudio de algunos de los factores que tienen influencia en el comportamiento balístico de la tela frente a impacto. Uno de estos factores se va a estudiar con especial énfasis y no es otro que el del número de capas de que se compone el panel balístico.

Para implementar este tipo de problemas en Abaqus, una vez se validó el modelo (propiedades de la tela, elementos...), se barajaron varias opciones:

- A. Creación de diferentes partes tipo Shell (capas de tela), y ensamblarlas unidas. Para llevar a cabo esta opción, había que ensamblar cada capa una detrás de la otra, con la creación de sus respectivos contactos entre ellas y entre ellas y el proyectil.
- B. Creación de diferentes partes tipo Shell, y ensamblarlas separadas una pequeña distancia. Esta opción era similar a la anterior con la única diferencia de que en este caso las capas estarían separadas entre ellas. También implicaba la creación de los contactos entre telas y entre telas y proyectil.
- C. Aumento del espesor en una única parte tipo Shell. Esta era la opción más simple, consistía en ir aumentando el espesor de la sección de una única parte conforme íbamos aumentando el número de capas. Con esta opción no era necesario crear más contactos que los creados ya en la validación del modelo.
- D. Crear sección Shell compuesta (*composite*). Este tipo de secciones es con la que se llevan a cabo las simulaciones con materiales compuestos. Como ya comentamos anteriormente, los tejidos textiles son, al igual que los materiales compuestos, materiales reforzados por fibras solo que sin material matriz o con un muy bajo porcentaje del mismo, por lo que ambos tienen muchas similitudes. En este caso, dentro de la sección se puede añadir el número de capas deseadas así como el material de cada una, la orientación y su espesor.

La primera opción que se trató de llevar a cabo fue la A, sin embargo, esta opción daba problemas a la hora de realizar el ensamblaje, puesto que, al estar modeladas las placas tipo Shell con un espesor despreciable y por tanto con un sólo nodo a lo largo de este espesor, a la hora de colocar una detrás de la otra, no se producía el efecto deseado, sino que se superponía una encima de la otra, lo que inducía posteriormente a errores a la hora de lanzar la simulación. Esta circunstancia, nos llevó a la opción B, sin embargo, el comportamiento balístico en capas separadas entre sí no es el mismo que en capas juntas, como se afirma en [10], lo que, junto con el hecho de que un número alto de capas separadas entre ellas iba a provocar que el tiempo computacional fuese excesivamente elevado, así como un exageradamente excesivo número de elementos en la malla que imposibilitarían computacionalmente llevar a cabo tantas simulaciones, hizo que esta opción quedase

descartada. Finalmente, entre la opción C y la D, pese a que los ensayos de prueba llevados a cabo mostraban bastantes similitudes entre los resultados obtenidos en ambas opciones, se decidió optar por la D, que, como veremos más adelante, nos proporcionará unos resultados que convergen con los de los ensayos disponibles en la literatura científica.

Por tanto, una vez tenemos el modelo validado y la opción de implementación de este tipo de problemas escogida, se realizaron numerosos impactos en sistemas de telas formados por 5, 10, 15, 20 y 25 capas con objeto de calcular el límite balístico de cada sistema. Para ello, se fueron realizando ensayos a velocidades superiores a 100 m/s (aproximadamente límite balístico de 1 capa), aumentado de 25 en 25 m/s hasta llegar a un cambio en el resultado (penetración - no penetración).

Los ensayos realizados, junto con sus respectivos resultados se representan en la siguiente tabla:

Número de capas	Velocidad de impacto (m/s)	Resultado
5 Capas	125	NP
	150	NP
	175	NP
	200	NP
	225	NP
	250	NP
	275	NP
	300	NP
	325	NP
	350	P
10 Capas	350	NP
	375	NP
	400	NP
	425	NP
	450	NP
	475	NP
	500	NP
	525	NP
	550	NP
	575	NP
15 Capas	600	P
	625	NP
20 Capas	650	P
	675	NP
25 Capas	700	P
	700	P

Tabla 5: Resultados obtenidos según el número de capas del panel balístico para el proyectil esférico.

Donde:

P = Penetración

NP = No penetración

Una vez obtenidos estos resultados, para el cálculo del límite balístico se siguieron los siguientes criterios:

1. Impacto penetrante (P), con una velocidad residual próxima a 0: en este caso tomamos el límite balístico de este valor.
2. Impacto no penetrante (NP), en el que se aprecia claramente que la tela está a punto de romper: en este caso tomamos el límite balístico igual a este valor.
3. No se da con claridad ninguno de los anteriores criterios: en caso de que esto ocurra, tomamos el límite balístico igual al punto medio entre los dos impactos con resultados distintos (penetración y no penetración).

De esta manera, nos quedan los siguientes resultados para el límite balístico en función del número de capas:

Número de capas	Límite balístico (m/s)
5	325
10	575
15	637.5
20	675
25	700

Tabla 6: Resultados obtenidos para el límite balístico según el número de capas para el proyectil esférico.

Con estos datos, podemos elaborar la siguiente gráfica que representa la evolución del límite balístico en función del número de capas:

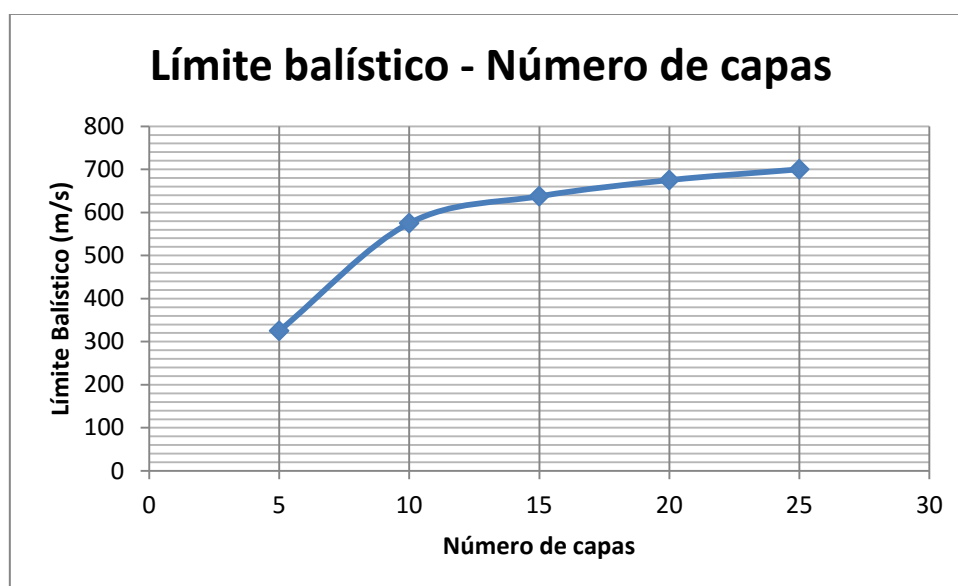


Figura 20: Evolución del límite balístico con el número de capas para el proyectil esférico.

Pese a que no se han encontrado en la literatura artículos que llevasen a cabo experimentos similares a este, con las mismas condiciones (material, proyectil, número de capas, condiciones de contorno...), se puede asumir la validez de los resultados obtenidos comparando con los resultados que arrojan los artículos [38] y [39], donde se llevan a cabo ensayos de impacto en sistemas de telas de Kevlar 29, formador por 23 y 44 capas. En estos ensayos, se obtienen resultados para el límite balístico de los sistemas de 23 capas que varían entre los 400 y los 800 m/s, dependiendo de la masa del proyectil, resultados que se asemejan a los obtenidos en este documento para sistemas de 20 y 25 capas. Además se aprecia que con un número alto de capas (22, 44), la variación del límite balístico no es demasiado grande, al igual que ocurre en nuestro problema a medida que el número de capas se hace grande (20, 25).

Cabe señalar que, a medida que el número de capas aumentaba, aumentaba con ello los puntos de integración del problema y, consecuentemente, el coste computacional. Es por ello que la malla se ha ido adecuando a las características de cada simulación, con objeto de no irrumpir en un coste computacional excesivo, que hubiese dificultado sobremedida la toma de resultados. Por tanto, se debe afirmar que a medida que aumenta el número de capas, se ha disminuido (mínimamente, para que no tuviese una gran repercusión en los resultados) la sensibilidad de la malla, por lo que se puede suponer que, al aumentar el número de capas, aumenta consecuentemente (de manera mínima) el margen de error de los resultados obtenidos.

4.4 Efecto de la geometría del proyectil

En este apartado, se procede a estudiar el efecto que tiene la geometría del proyectil en el límite balístico sistemas de telas de varias capas. Los proyectiles escogidos son los siguientes:

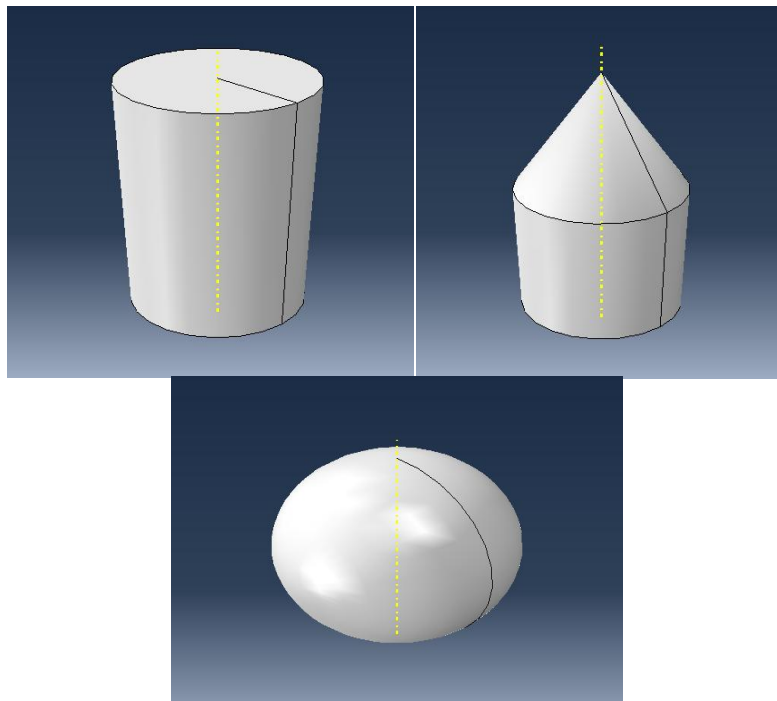


Figura 21: Distintos proyectiles utilizados en los estudios llevados a cabo.

Tenemos, por tanto, un proyectil esférico, un proyectil cilíndrico y un proyectil cilíndrico de cabeza cónica. El efecto del proyectil esférico ya lo tenemos estudiado en el apartado anterior, a continuación se llevarán a cabo los estudios en los otros dos proyectiles y posteriormente se realizará una comparación entre ellos.

4.4.1 Proyectil cilíndrico

La manera de llevar a cabo el estudio ha sido la misma que para el proyectil esférico (mismo modelo, mismo método de implementar sistemas de capas...), lo único que cambia es la geometría del proyectil.

Para hallar los parámetros característicos de la geometría del proyectil (radio y altura del cilindro), se ha tenido en cuenta que, con objeto de conservar la misma energía cinética que el proyectil esférico, la masa de ambos debe ser la misma (0.625 g) y además deben estar modeladas del mismo material (acero), por lo que su densidad debe ser también igual. Por tanto, siguiendo:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

a igualdad de masas y densidades nos queda que sus volúmenes deben ser iguales, teniendo:

$$\frac{4}{3}\pi r_e^3 = \pi r_c^2 h$$

asumiendo por simplicidad que $h = 2D_c = 4r_c$, nos queda que:

$$r_c = 1.855 \text{ mm}$$

$$h = 7.42 \text{ mm}$$

Por tanto, una vez obtenidos los valores característicos de la geometría del proyectil, empleando el mismo método utilizado en el apartado anterior para el cálculo de los límites balísticos, obtenemos los siguientes resultados:

Número de capas	Velocidad de impacto (m/s)	Resultado
5 Capas	200	NP
	225	NP
	250	P
10 Capas	275	NP
	300	NP
	325	NP
	350	NP
	375	NP
	400	NP
	425	P
	450	NP
15 Capas	475	P
	475	P
20 Capas	475	NP
	500	P

Tabla 7: Resultados obtenidos según el número de capas del panel balístico para el proyectil cilíndrico.

Con estos resultados, utilizando los mismos criterios de antes para la determinación del límite balístico, obtenemos:

Número de capas	Límite balístico (m/s)
5	225
10	400
15	450
20	475
25	500

Tabla 8: Resultados obtenidos para el límite balístico según el número de capas para el proyectil cilíndrico.

De la misma manera que antes, con estos datos, podemos elaborar la siguiente gráfica que representa la evolución del límite balístico en función del número de capas:

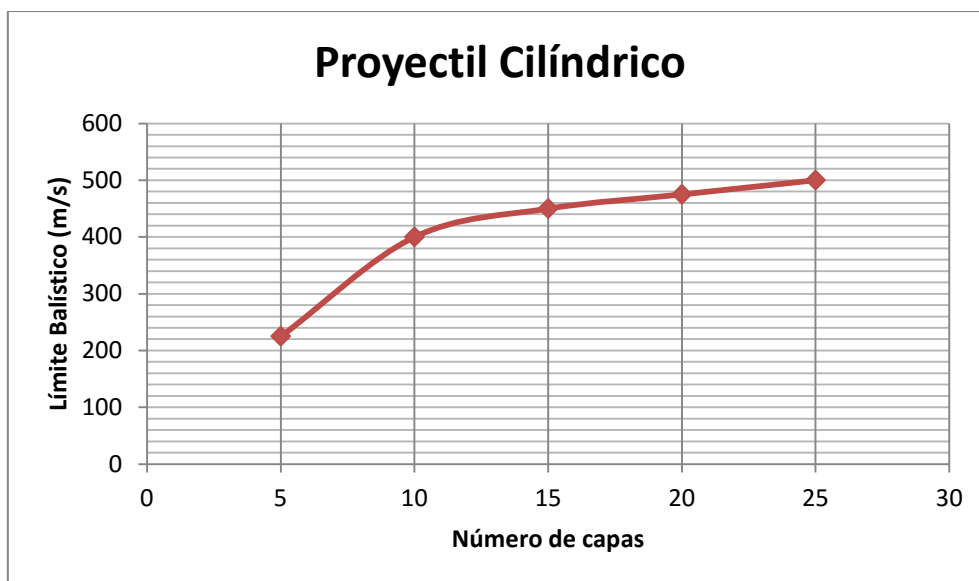


Figura 22: Evolución del límite balístico con el número de capas para el proyectil cilíndrico.

4.4.2 Proyectil cilíndrico de cabeza cónica

Procediendo igual que con el proyectil cilíndrico, debemos calcular los parámetros característicos de la geometría del proyectil, en este caso, radio del cilindro, altura del cilindro y altura del cono. Sabemos que el volumen debe ser igual al de los anteriores proyectiles, por tanto tenemos:

$$\frac{4}{3}\pi r_e^3 = \pi r^2 h_{ci} + \frac{1}{3}\pi r^2 h_{co}$$

donde basta con dar valores al radio y altura del cilindro para, hallando la altura del cono, conocer completamente los valores de los parámetros característicos para que la geometría del proyectil quede completamente determinada:

$$r = 2 \text{ mm}$$

$$h_{ci} = 5 \text{ mm}$$

$$h_{co} = 4.14 \text{ mm}$$

Procediendo de la misma manera que con los dos proyectiles anteriores, obtenemos los siguientes resultados:

Número de capas	Velocidad de impacto (m/s)	Resultado
5 Capas	100	NP
	125	P
10 Capas	150	NP

15 Capas	175	P
	200	NP
	225	P
20 Capas	225	NP
	250	P
25 Capas	250	NP
	275	P

Tabla 9: Resultados obtenidos según el número de capas del panel balístico para el proyectil cilíndrico de cabeza cónica.

Con estos resultados, utilizando los mismos criterios de antes para la determinación del límite balístico, obtenemos:

Número de capas	Límite balístico (m/s)
5	100
10	175
15	225
20	250
25	275

Tabla 10: Resultados obtenidos para el límite balístico según el número de capas para el proyectil cilíndrico de cabeza cónica.

Y una vez más, de la misma manera que antes, con estos datos, podemos elaborar la siguiente gráfica que representa la evolución del límite balístico en función del número de capas:

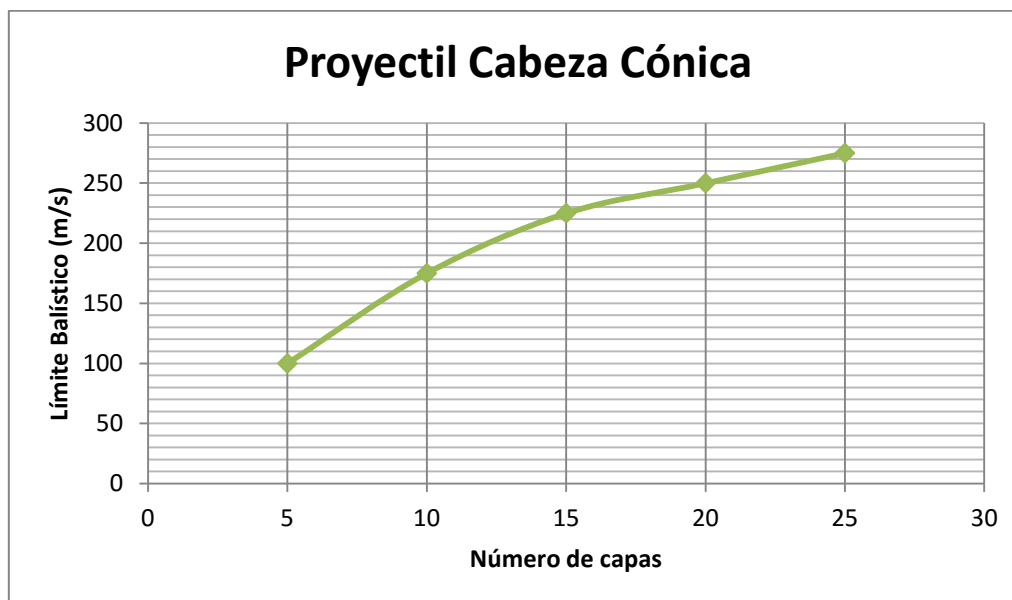


Figura 23: Evolución del límite balístico con el número de capas para el proyectil cilíndrico de cabeza cónica.

4.4.3 Comparativa

Comparando, en una misma representación gráfica, los resultados obtenidos para las tres geometrías del proyectil, nos queda:

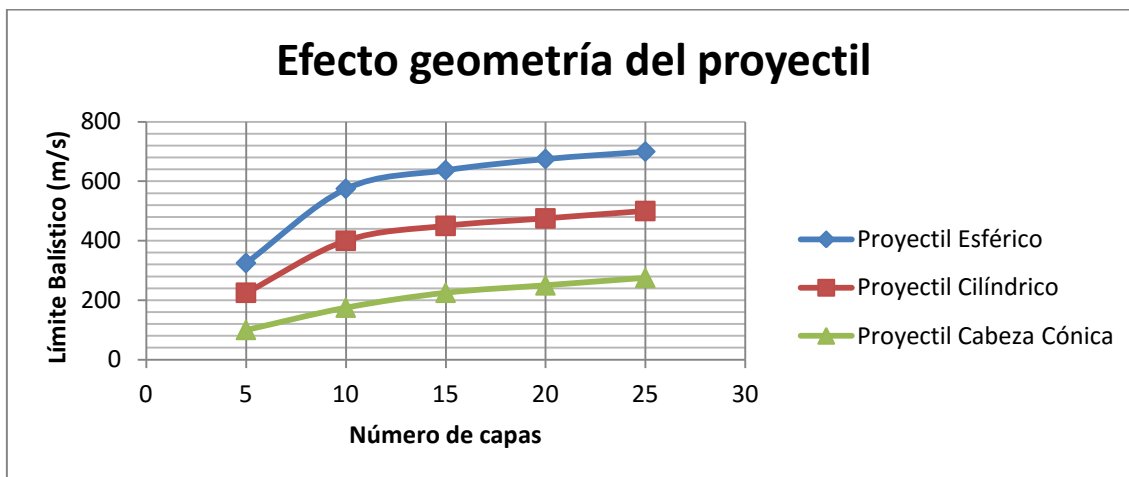


Figura 24: Comparativa de la evolución del límite balístico con el número de capas para los tres proyectiles utilizados.

En el próximo bloque se comentarán los resultados obtenidos, así como las causas por las que se dan estos resultados.

4.5 Efecto de las condiciones de contorno

Sabemos, como se ha comentado en apartados anteriores, que otro de los factores que influyen en el comportamiento balístico de una tela, es el de las condiciones de contorno. Existen en la literatura científica diversos artículos que analizan esta influencia.

En este documento, se pretende también comprobar y analizar el efecto que tienen las condiciones de contorno del problema en el comportamiento balístico de una tela. Para ello, se han realizado simulaciones para el modelo validado, para una sola capa, variando únicamente las condiciones de contorno: 2 y 4 laterales fijos.

Puesto que asumimos que la geometría del proyectil no tiene efecto alguno en las posibles variaciones de las diferencias de los resultados entre los dos tipos de condiciones de contorno,

estas simulaciones se harán únicamente para un tipo de proyectil. El proyectil elegido ha sido el proyectil cilíndrico (no existe ninguna razón especial por la que se ha elegido este proyectil, podría haber sido cualquier otro).

Por tanto, para analizar este efecto, se han realizado simulaciones de impacto a varias velocidades superiores al límite balístico de la tela, con objeto de obtener y analizar posibles diferencias en los resultados. Con estos resultados se pretende construir una gráfica $V_r - V_i$, con el fin de poder apreciar bien estas posibles diferencias. Las simulaciones llevadas a cabo y sus respectivos resultados son los siguientes:

$V_i(m/s)$	$V_r(m/s)$ 2 laterales fijos	$V_r(m/s)$ 4 laterales fijos
275	256.8	259
250	229.4	233.7
225	198.3	205.6
200	161.2	180
175	128.2	149.6

Tabla 11: Resultados de la velocidad residual obtenidos para los distintos impactos llevados a cabo con las condiciones de contorno estudiadas.

Resultados que nos permiten construir la siguiente gráfica:

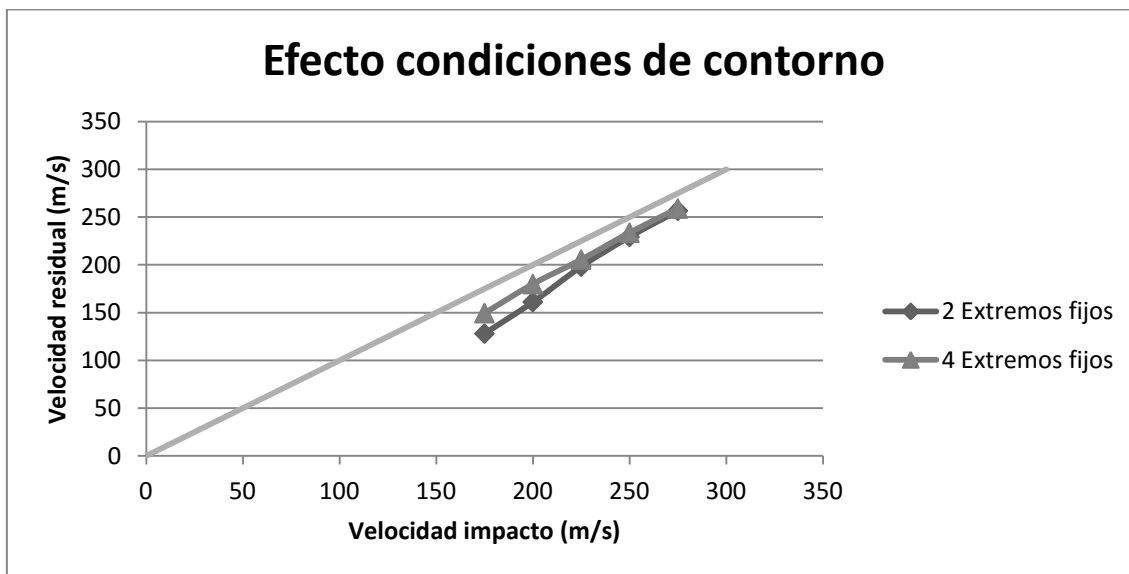


Figura 25: Representación de las curvas $V_r - V_i$ para las dos condiciones de contorno estudiadas.



5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Número de capas y geometría del proyectil

Respecto a los resultados obtenidos en el estudio del efecto del número de capas, éstos muestran que a medida que aumenta el número de capas, lo hace de la misma manera el límite balístico del sistema. Esto era lo esperado desde un primer momento, ya que se trata de algo lógico y puede ser explicado desde el punto de vista de la superficie que tiene que atravesar el proyectil para lograr la penetración a lo largo del sistema y de la energía que este sistema es capaz de absorber. Cuando aumenta el número de capas, aumenta el espesor del sistema de capas y por tanto aumenta la distancia que debe lograr atravesar el proyectil, lo que dificulta su perforación, esto, junto con el aumento de la capacidad de absorción de energía del sistema a medida que aumentamos el número de capas, hace que la dificultad del proyectil para atravesar las telas aumente a medida que aumentamos el número de capas.

También, de la Figura 20, podemos observar que el aumento del límite balístico respecto al número de capas es mayor para pocas capas (5 a 10, 10 a 15) que para muchas (15 a 20, 20 a 25). Esto también es algo lógico, puesto que la proporción en que se produce este aumento al principio es mayor que al final, esto es, cuando pasamos de 5 a 10 capas, estamos aumentando el número de capas en un 200%, mientras que cuando pasamos de 20 a 25 capas, este aumento consiste en un 25%, lo que provoca que el aumento del límite balístico sea menor.

Respecto a los resultados obtenidos en el estudio del efecto de la geometría del proyectil, observamos que la forma de las curvas es prácticamente idéntica, sin embargo se observan claras diferencias en los valores de los límites balísticos. El proyectil de cabeza cónica es el que necesita, en todos los casos, menores velocidades para penetrar los sistemas, mientras que el proyectil esférico es el que más dificultades encuentra para hacerlo, situándose el proyectil cilíndrico en un punto medio. Los principales factores que explican los resultados obtenidos son los siguientes:

- **Superficie frontal:** la superficie frontal de un proyectil tiene importancia en su habilidad para perforar una tela o un sistema de telas. Cuanto mayor es la superficie frontal del proyectil, mayor es la superficie que éste debe romper para atravesar el sistema y, además, mayor es la capacidad de la tela para absorber la energía cinética del proyectil puesto que la superficie involucrada en el impacto es mayor. En la literatura científica encontramos estudios que corroboran este hecho como los de Shockey et al. [40] y [16]. En nuestro caso, el área de impacto de los proyectiles viene fuertemente determinado por el diámetro de los mismos, el proyectil con mayor diámetro es el proyectil esférico, el cual tiene un valor de 5.35 mm, mientras que el proyectil cilíndrico tiene un diámetro de 3.71 mm y el proyectil de cabeza cónica tiene un diámetro de 4 mm.

- **Forma de la cabeza:** la forma de la cabeza es otro de los factores que tienen especial importancia en la habilidad de perforación del proyectil. Los proyectiles de cabeza cónica son los que más facilidad tienen para atravesar sistemas de telas gracias a su cabeza puntiaguda, la cual le permite romper con relativa facilidad la tela y, a partir de ahí, "colar" el resto del cuerpo a través del orificio realizado con su cabeza. Este hecho además explica que el proyectil de cabeza cónica sea el que menos grado de deformación de la tela necesita para perforarla. Algunos estudios de la literatura científica como el de Lim et al. [41] coinciden en este hecho.
- **Ejes afilados:** la posesión de ejes afilados en la geometría del proyectil también influye en su capacidad para perforar una tela o un sistema de varias telas. Este hecho se constata también en estudios como el de Prosser et al. [42]. En nuestro caso, el proyectil esférico no tiene ningún eje afilado, lo que provoca que la manera de perforar las telas de este proyectil sea llevarlas hasta su valor de fallo produciendo una gran deformación de las mismas. El proyectil cilíndrico, en cambio, sí que tiene ejes afilados, lo que provoca que sea capaz de alcanzar la tensión de fallo de la tela con mucha mayor facilidad y, por tanto, con una cantidad menor de deformación. El proyectil de cabeza cónica, como ya hemos comentado, gracias a su cabeza puntiaguda es capaz de provocar esta tensión de fallo muy fácilmente, para bajas cantidades de deformación de las telas.

5.1.1 Evolución del impacto

Con el fin de observar la forma en la que se produce el impacto para cada tipo de proyectil, así como la manera en la que se deforma la tela durante el mismo, se presentan las siguientes imágenes que describen el proceso de impacto para cada geometría del proyectil. Se han escogido impactos penetrantes en 5 capas próximos al límite balístico, con el fin de apreciar la mayor deformación posible de la tela.

➤ **Proyectil esférico.**

Impacto en 5 capas con $V_i = 350 \text{ m/s}$. El impacto se estudia en un período de tiempo $t = 80 \mu\text{s}$. Para que se aprecie bien el proceso, se muestra únicamente una mitad tanto de la tela como del proyectil como se puede apreciar en las siguientes imágenes.

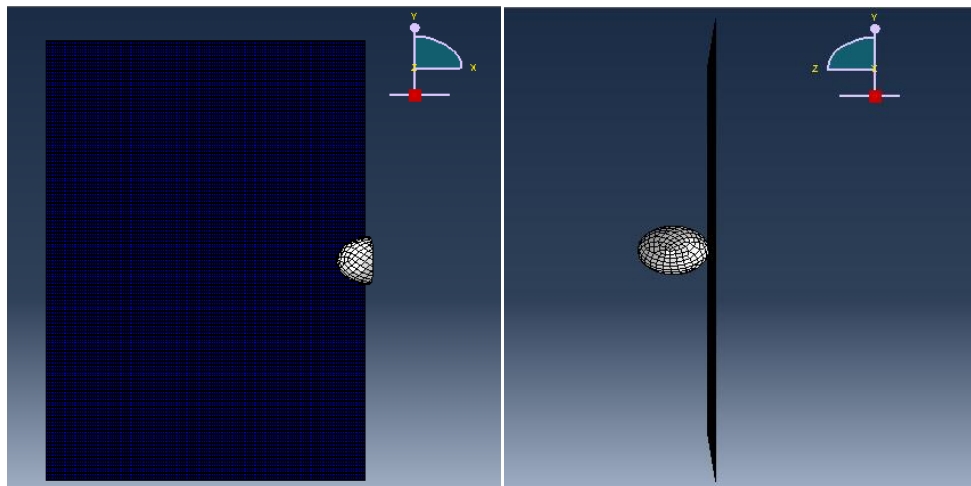
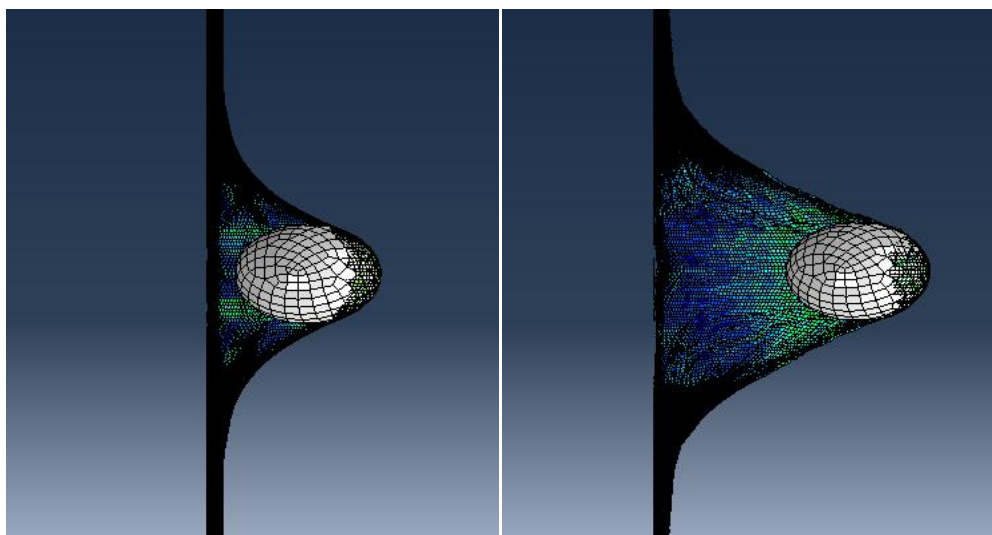


Figura 26: Imágenes del instante inicial del impacto del proyectil esférico a 350 m/s sobre 5 capas desde dos vistas diferentes.



$t = 20\mu s$

$t = 40\mu s$

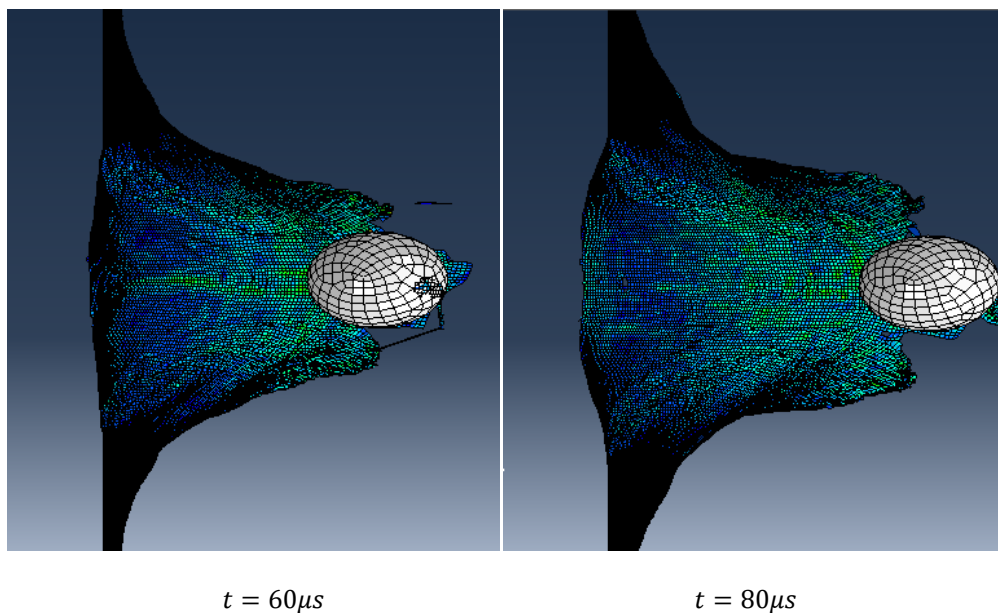


Figura 27: Imágenes de la evolución del impacto respecto al tiempo para varios tiempos distintos para el impacto del proyectil esférico a una velocidad de 350 m/s sobre 5 capas.

Podemos observar claramente, que el proyectil esférico necesita provocar una gran cantidad de deformación en la tela para lograr perforarla, produciéndose esta perforación en los instantes finales del proceso.

➤ **Proyectil cilíndrico.**

Impacto en 5 capas con $V_i = 250 \text{ m/s}$. Al igual que en el impacto anterior, el impacto se estudia en un período de tiempo $t = 80\mu s$. De la misma manera, se muestra únicamente una mitad tanto de la tela como del proyectil.

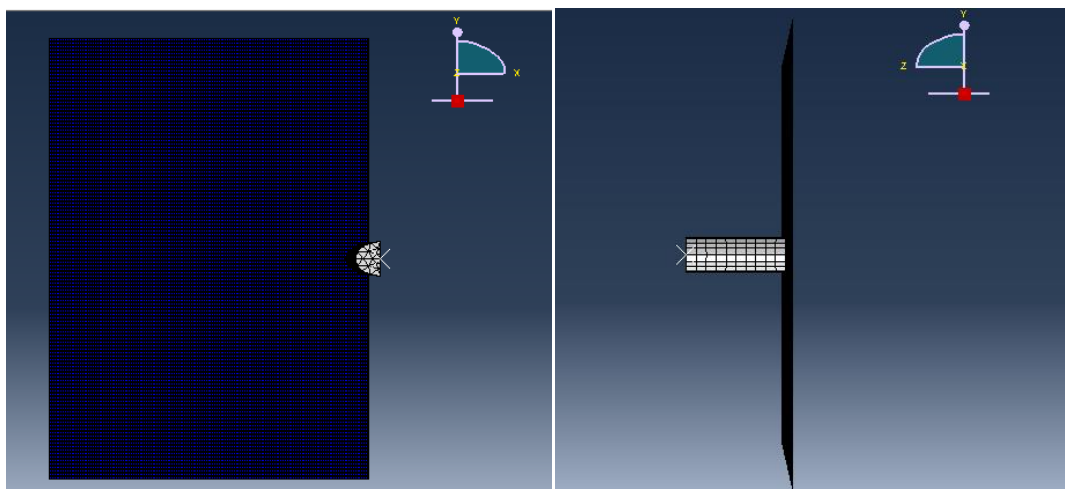


Figura 28: Imágenes del instante inicial del impacto del proyectil cilíndrico a 250 m/s sobre 5 capas desde dos vistas diferentes.

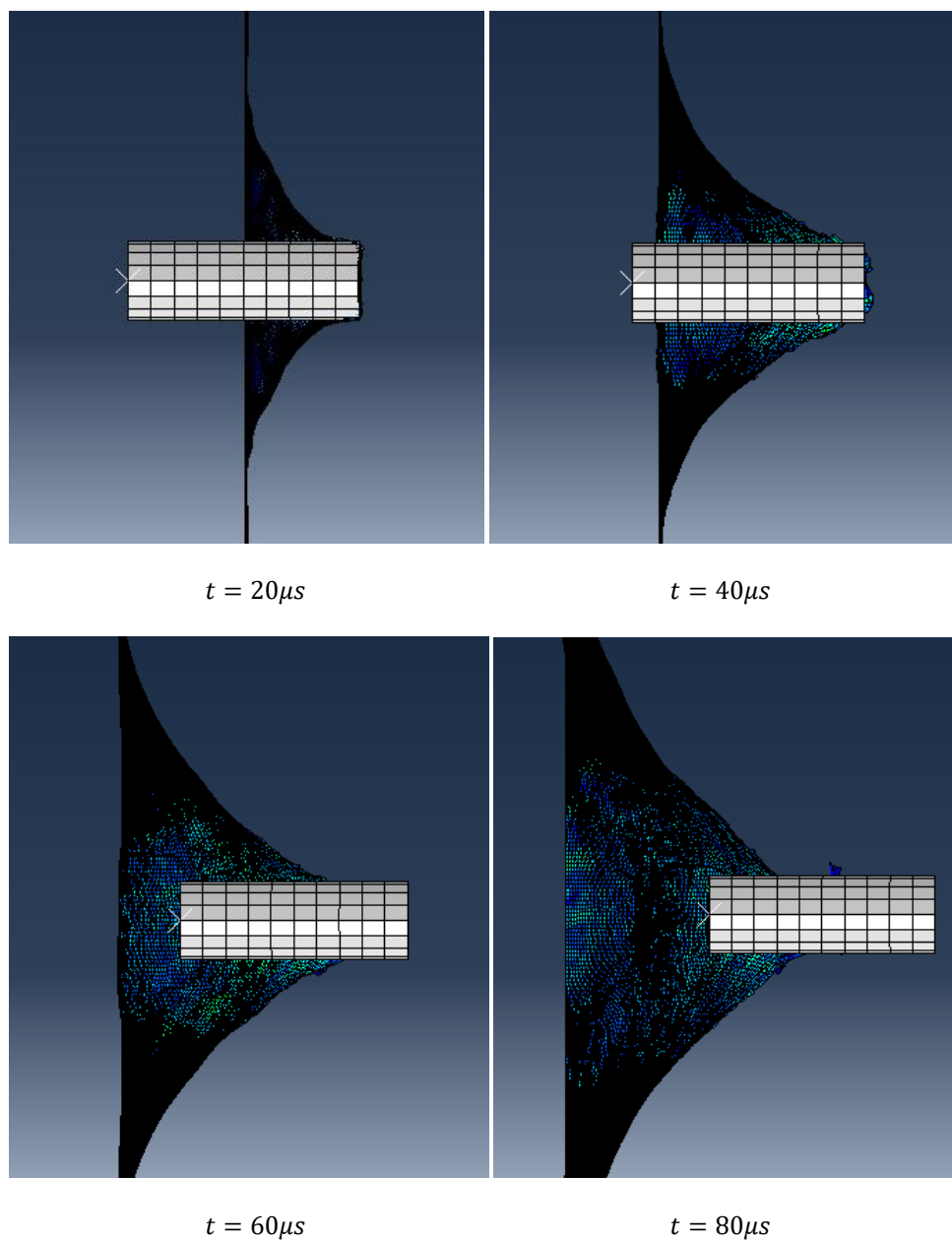


Figura 29: Imágenes de la evolución del impacto respecto al tiempo para varios tiempos distintos para el impacto del proyectil cilíndrico a una velocidad de 250 m/s sobre 5 capas.

Pese a ser un impacto a una velocidad inferior al anterior, se produce prácticamente en el mismo período de tiempo, ya que necesita de una menor cantidad de deformación de la tela que el proyectil esférico para perforarla, gracias, como comentamos anteriormente, al carácter cortante de sus aristas.

➤ **Proyectil cilíndrico de cabeza cónica.**

Impacto en 5 capas con $V_i = 125 \text{ m/s}$. Al igual que en el impacto anterior, el impacto se estudia en un período de tiempo $t = 80 \mu\text{s}$. De la misma manera, se muestra únicamente una mitad tanto de la tela como del proyectil.

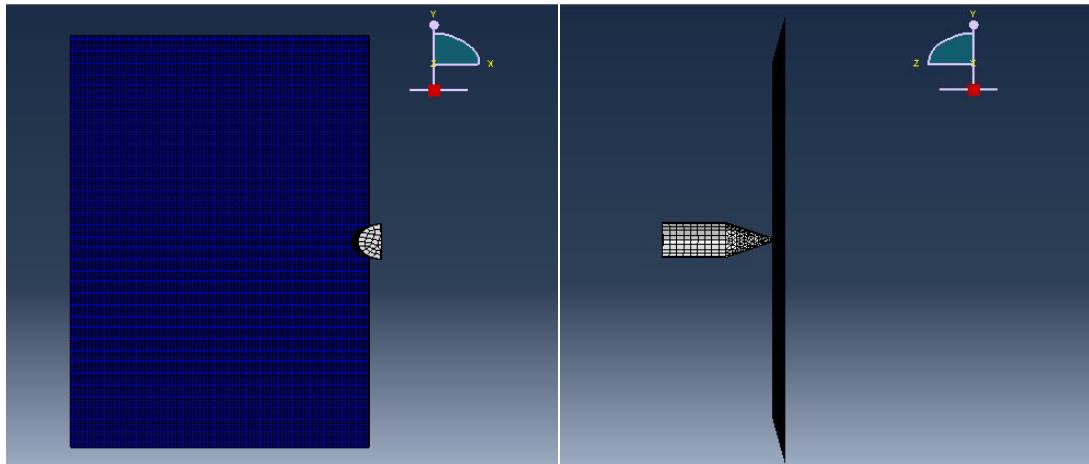
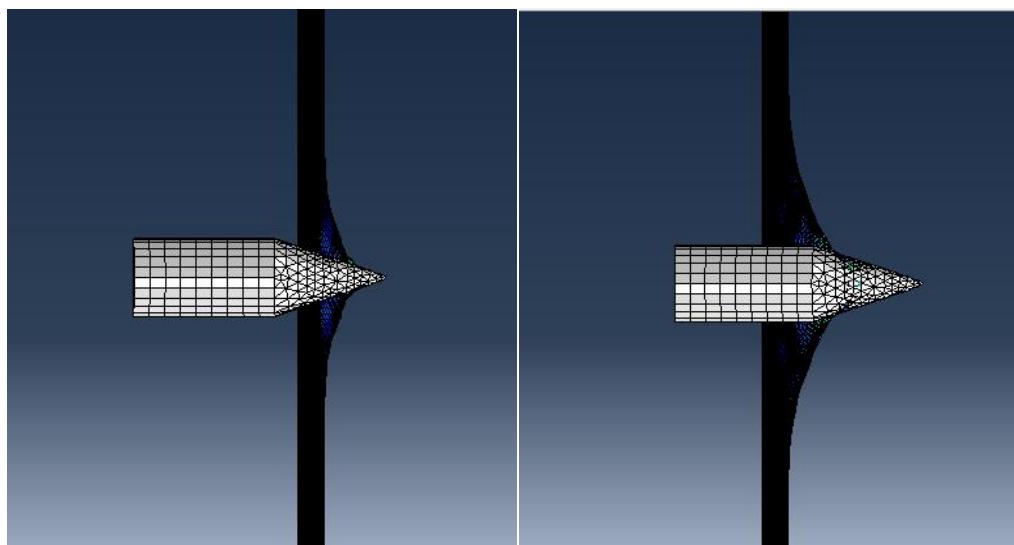


Figura 30: Imágenes del instante inicial del impacto del proyectil cilíndrico de cabeza cónica a 125 m/s sobre 5 capas desde dos vistas diferentes.



$t = 20 \mu\text{s}$

$t = 40 \mu\text{s}$

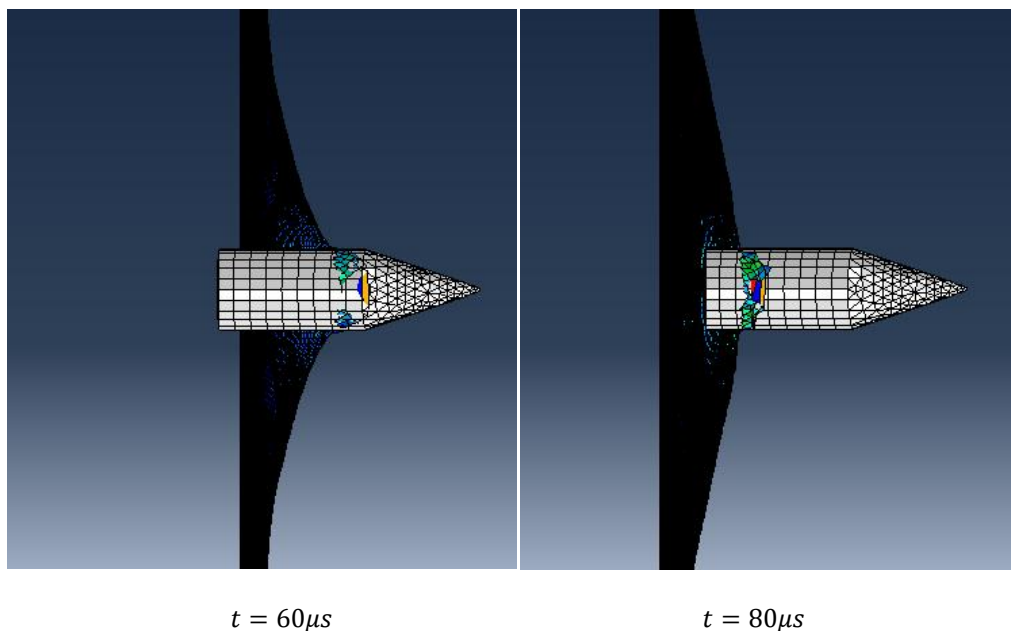


Figura 31: Imágenes de la evolución del impacto respecto al tiempo para varios tiempos distintos para el impacto del proyectil cilíndrico de cabeza cónica a una velocidad de 125 m/s sobre 5 capas.

De la misma manera que ocurría antes, pese a ser un impacto a una velocidad inferior a los anteriores, se produce prácticamente en el mismo período de tiempo, ya que necesita todavía de una menor cantidad de deformación de la tela que los otros dos proyectiles, logrando perforar la tela gracias a su cabeza puntiaguda.

5.1.2 Modo de fallo

Con el objetivo de apreciar y explicar el modo de fallo de la tela según el tipo de proyectil, se muestran a continuación, con imágenes, las etapas por las que pasa la tela durante el impacto. Por simplicidad, y para apreciar los impactos que producen máxima deformación en la tela, se utilizarán los mismos impactos del apartado anterior, esto es, impactos en 5 capas próximos al límite balístico para cada proyectil.

➤ Proyectil esférico.

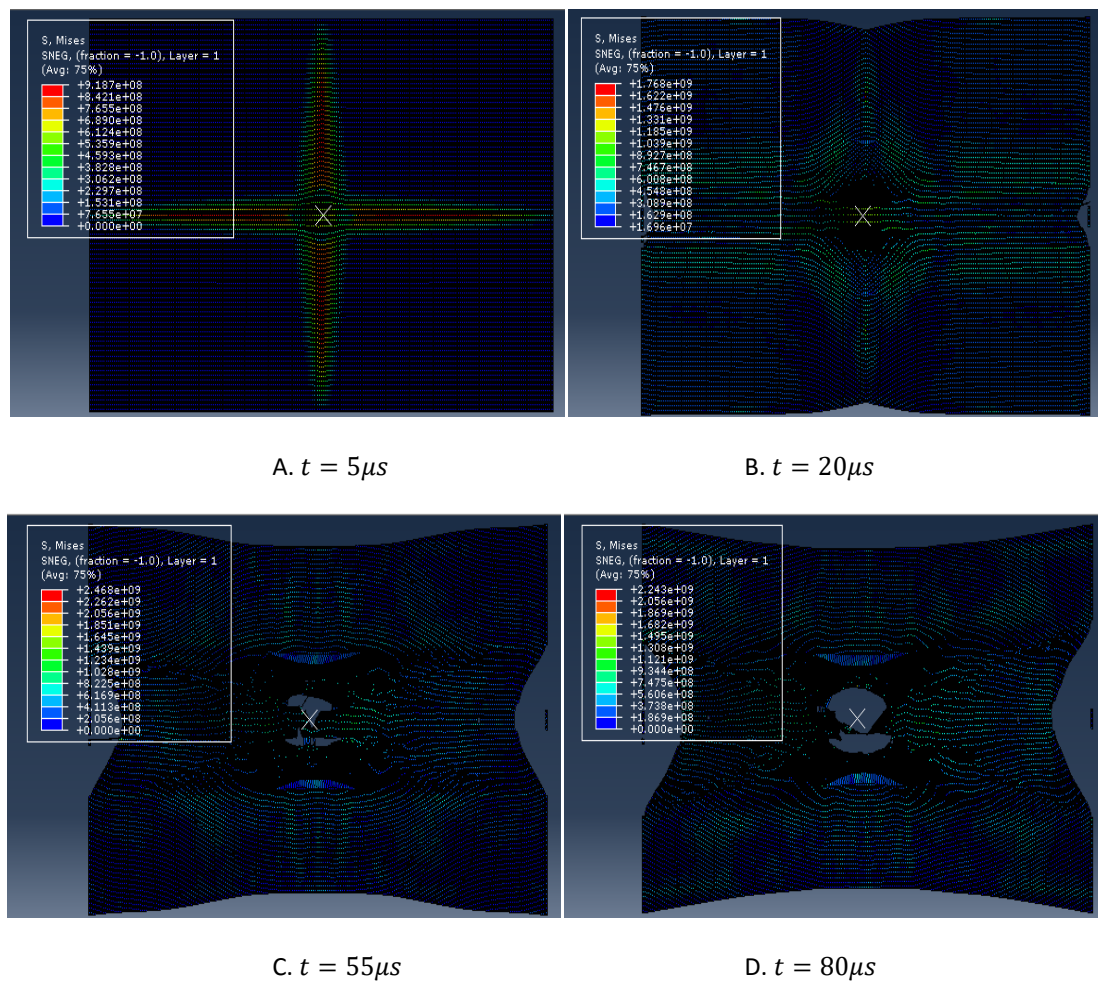


Figura 32: Imágenes de la evolución con el tiempo del mapa de tensiones para el impacto del proyectil esférico a 350 m/s sobre 5 capas.

Podemos dividir el impacto en 4 etapas claramente diferenciadas.

- Es la etapa en la que se produce el inicio del impacto, el primer contacto entre el proyectil y la tela. La zona de mayor tensión es la zona de los hilos principales, como la tensión inicial todavía no ha llegado a alcanzar los laterales de la tela, esta tensión es igual en ambas direcciones (la de los ejes fijos y la de los que no lo están).
- En esta etapa la tensión inicial provocada por el impacto ya se ha extendido hasta llegar a los extremos de la tela, donde se ha encontrado con dos laterales fijos y otros dos sueltos. La zona de mayor tensión sigue siendo la de los hilos principales, aunque esta vez únicamente en una dirección, la dirección perpendicular a los laterales fijos. Además, observamos que, debido a la gran deformación que produce el proyectil, empieza a "despegarse" la tela de los laterales en los que estaba fija.
- En esta etapa ya se ha producido el fallo de la tela en la zona de impacto, sin embargo, ese fallo todavía es insuficiente para que el proyectil la atraviese por completo. Además, la tela sigue despegándose de los extremos fijos.

- D. Etapa final en la que el agujero inicial en la zona de impacto se ha agrandado y el proyectil es capaz de atravesar la tela por completo.

En base a las imágenes mostradas y a lo comentado en la explicación de las etapas, se puede afirmar que la rotura de la tela que permite la perforación del proyectil, se produce por fallo de las fibras principales a tracción en la dirección perpendicular a los laterales fijos, alcanzándose la tensión máxima de fallo en la zona de impacto debido a la gran deformación producida en la tela. Además, debido a esta gran deformación que produce este proyectil en la tela, observamos también como se produce fallo también en los laterales fijos, despegándose la tela de estos.

➤ **Proyectil cilíndrico.**

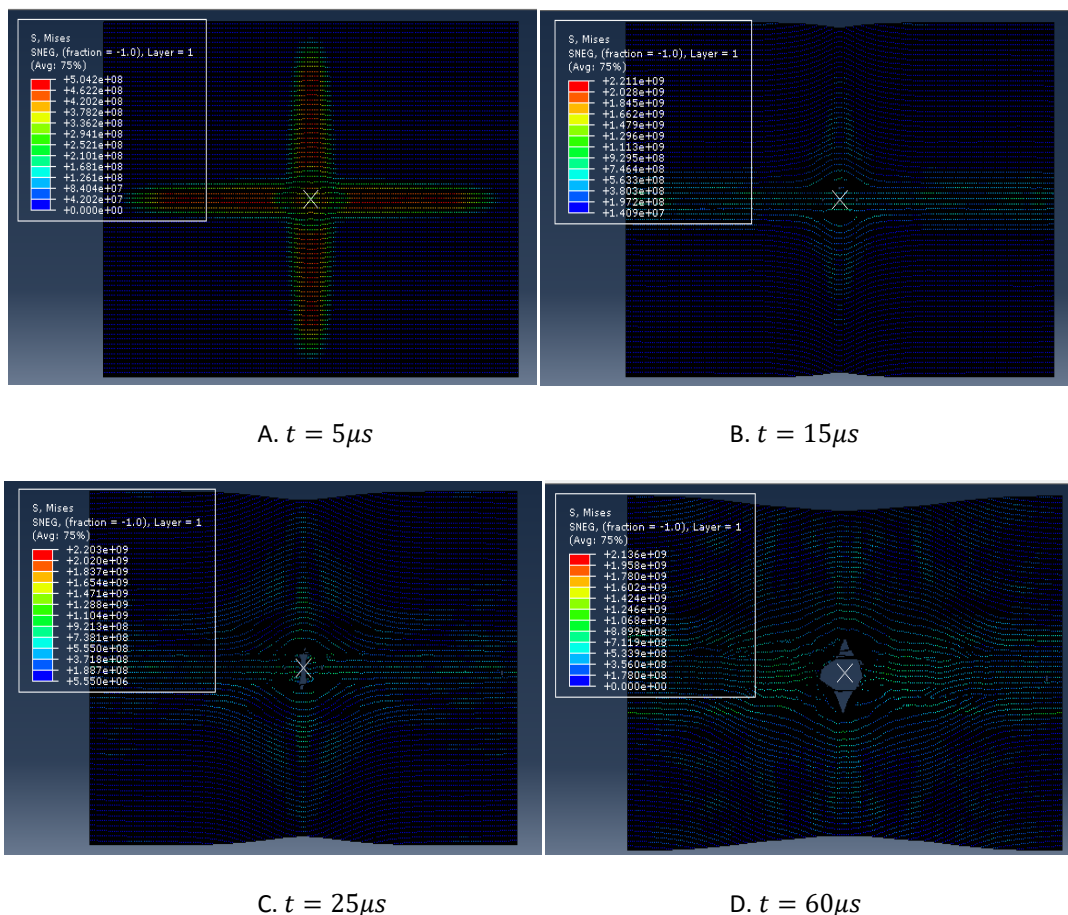


Figura 33: Imágenes de la evolución con el tiempo del mapa de tensiones para el impacto del proyectil cilíndrico a 250 m/s sobre 5 capas.

Las imágenes muestran las mismas etapas que en el impacto del proyectil esférico. En este caso podemos ver que la tensión en los hilos principales es más localizada, debido al menor

área frontal que presenta el proyectil cilíndrico con respecto al esférico. Además, el fallo en este caso se produce antes, gracias a las aristas cortantes del frente del proyectil. También cabe señalar, que en este caso no se produce rotura en los laterales fijos de la tela, ya que el grado de deformación de la misma es menor con respecto al proyectil anterior, debido a su menor capacidad de absorber la energía cinética del proyectil, debido a su vez a la geometría del mismo (menor área frontal y aristas cortantes). Dicho esto, podemos afirmar que la rotura de la tela se produce por el fallo de las fibras principales a tracción en la dirección perpendicular a los laterales fijos, alcanzándose su tensión máxima de fallo en la zona de impacto debido a la deformación producida en la tela, así como al carácter cortante del proyectil.

➤ **Proyectil cilíndrico de cabeza cónica.**

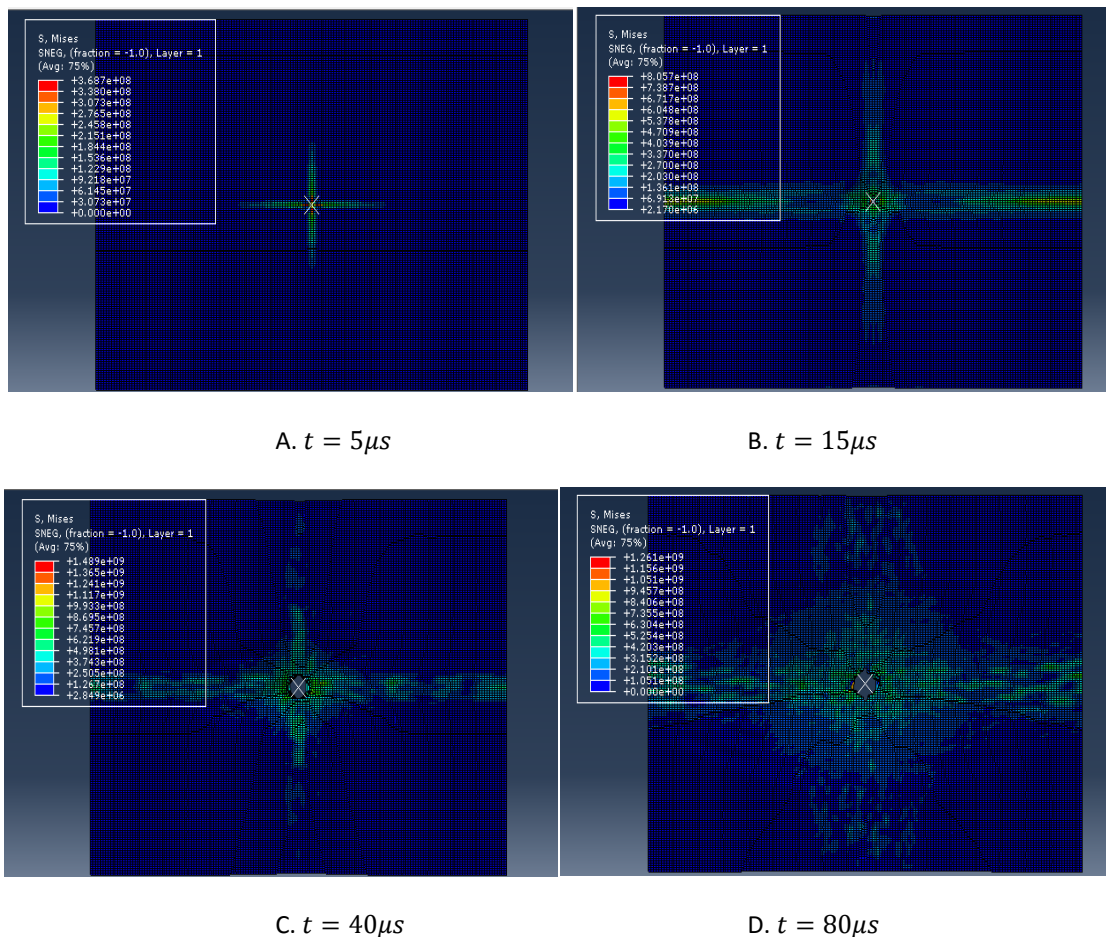


Figura 34: Imágenes de la evolución con el tiempo del mapa de tensiones para el impacto del proyectil cilíndrico de cabeza cónica a 125 m/s sobre 5 capas.

Apreciamos, en este caso también, las mismas etapas que en los anteriores. Para este proyectil, el daño es todavía más localizado que para los dos anteriores, debido a la geometría puntiaguda de la cabeza del proyectil que provoca muy fácilmente un pequeño agujero en la

tela por el que posteriormente logra "colarse". Este hecho de que la tensión esté muy localizada en la zona de impacto y en la zona de los hilos principales hace que la tela sea capaz de absorber muy poca energía, lo que provoca que la deformación existente en la misma sea muy pequeña. En este caso, el hecho de que la tela alcance la tensión de fallo en la zona del impacto, pese a que las tensiones se distribuyen de la misma manera que en los proyectiles anteriores, tiene más que ver con el carácter penetrante de la cabeza del proyectil y su habilidad para "colarse" por el pequeño agujero que produce la punta de esta cabeza, que por la deformación producida en la tela.

Como se aprecia en las imágenes mostradas, y con lo comentado anteriormente, pese a que la geometría del proyectil afecta fuertemente al nivel de resistencia de las telas frente a impacto (como muestran las gráficas mostradas en apartados anteriores), la distribución de tensiones en los tres proyectiles es muy parecida. En cuanto al modo de fallo, en el caso del proyectil esférico es claro, fallo de las fibras principales a tracción en la dirección perpendicular a los laterales fijos, alcanzándose la tensión de fallo en la zona de impacto debido a la deformación producida en la tela, sin embargo, pese a que el fallo en el caso del proyectil de cabeza cónica se produce también porque se alcanza la tensión máxima a tracción en la zona de impacto, este hecho tiene más que ver con el carácter punzante de la cabeza del mismo que con la deformación que produce en la zona de los hilos principales en la dirección perpendicular a los laterales fijos. El proyectil cilíndrico se encuentra en un punto medio, puesto que el modo de fallo tiene que ver con la deformación producida en esa misma zona así como con el carácter cortante de sus aristas.

A continuación vamos a comprobar si las condiciones de contorno tienen efecto en el modo de fallo de la tela.

5.2 Condiciones de contorno

Los resultados obtenidos en el apartado 4.5. permiten apreciar el efecto de las condiciones de contorno en el comportamiento balístico de una tela. Vemos que la tela con 2 laterales fijos es capaz de frenar en mayor medida los impactos que la tela con 4 laterales fijos, lo que se traduce en unas velocidades residuales menores. Apreciamos además que este efecto es mayor a medida que disminuye la velocidad de impacto: con bajas velocidades de impacto, como por ejemplo $V_i = 175 \text{ m/s}$, observamos una variación de 21.4 m/s , mientras que con altas velocidades de impacto, $V_i = 275 \text{ m/s}$, la diferencia es mínima: 2.2 m/s .

El hecho de que la tela con dos laterales fijos sea capaz de resistir en mayor medida el impacto frente a la tela con cuatro laterales fijos, se debe a su mayor capacidad para absorber la energía cinética del proyectil. Con los cuatro laterales fijos, como veremos a continuación, la

tensión que produce el impacto en la tela se presenta de una forma más localizada, reduciéndose el daño a la zona de los hilos principales y el área más adyacente a estos hilos, lo que se traduce en una menor superficie afectada por el impacto y, por tanto, en una menor superficie capaz de absorber energía. En los impactos con dos laterales fijos, prácticamente toda la superficie de la tela está involucrada en la absorción de la energía cinética del proyectil, lo que provoca que la tela presente mayor resistencia en los impactos con este tipo de condición de contorno, obteniéndose así menores velocidades residuales.

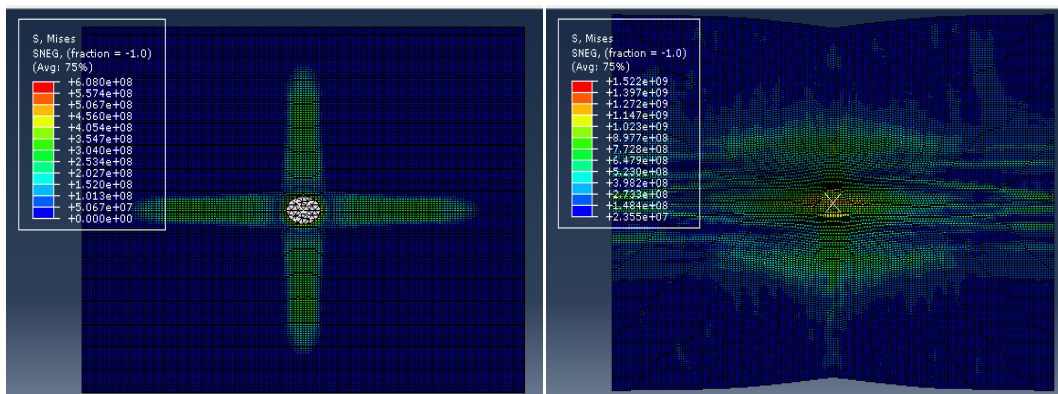
Estos resultados obtenidos para el análisis del efecto de las condiciones concuerdan con los resultados obtenidos en los estudios encontrados en la literatura científica para este tipo de estudios [43], [24], en los que los resultados obtenidos indican que la tela con 2 laterales fijos es capaz de absorber mayor cantidad de energía que la tela con los 4 laterales fijos, lo que se traducen en unas velocidades residuales mayores y un límite balístico menor para la tela con los 4 laterales fijos. Además también se aprecia que cuanto mayores son las velocidades de impacto, menor es la importancia de las condiciones de contorno.

Para este tipo de análisis, como todos los impactos se han llevado a cabo con el mismo proyectil, no se va a estudiar el proceso de impacto, puesto que será similar en ambos tipos de condiciones de contorno. Sí se va a analizar el modo de fallo para saber qué papel juega el efecto de las condiciones de contorno en esta cuestión.

5.2.1 Modo de fallo

Con el objetivo de apreciar y explicar el papel que juegan las condiciones de contorno del problema en el modo de fallo de la tela, se muestran a continuación, con imágenes, las etapas por las que pasa la tela durante el impacto. Se han escogido las simulaciones a $V_i = 175 \text{ m/s}$.

➤ Dos laterales fijos.



A. $t = 5 \mu\text{s}$

B. $t = 36 \mu\text{s}$

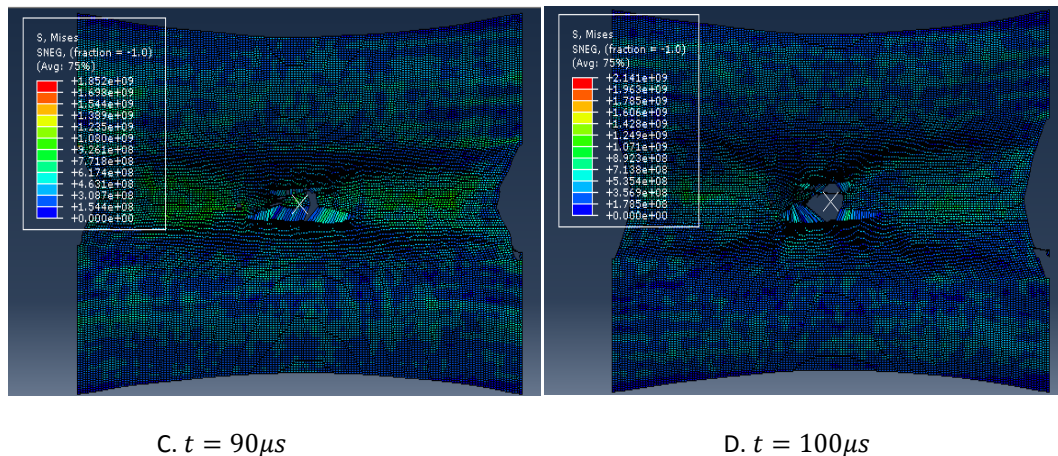


Figura 35: Imágenes de la evolución con el tiempo del mapa de tensiones para el impacto del proyectil cilíndrico a 175 m/s en una tela de una capa sujeta por dos de sus laterales.

Como no podía ser de otra manera, las etapas son las mismas que para el estudio de la geometría del proyectil, ya que las condiciones de contorno siguen siendo las mismas, lo único que hemos cambiado ha sido el número de capas y la velocidad de impacto. Lo único que cambia, por tanto, son los momentos en los que aparecen cada una de las etapas, puesto que los impactos son a una velocidad menor que para el caso del estudio de la geometría del proyectil, estas etapas aparecen en tiempos posteriores a los de antes.

El modo de fallo que presentan estos ensayos con la tela fija en dos laterales, es el mismo que anteriormente, la tela falla porque se alcanza su tensión de máxima de rotura a tracción en los hilos principales en la dirección perpendicular a los laterales fijos. Esta tensión máxima se alcanza, como hemos comentado anteriormente en el caso del proyectil cilíndrico, por dos factores principalmente: la deformación que produce el proyectil en la tela y el carácter cortante de las aristas vivas del proyectil cilíndrico.

Observamos además, igual que ocurría anteriormente para el caso del proyectil esférico, que la tela también falla en sus laterales fijos, "despegándose" de estos debido a la gran tensión producida en los laterales fijos durante el impacto.

➤ Cuatro laterales fijos.

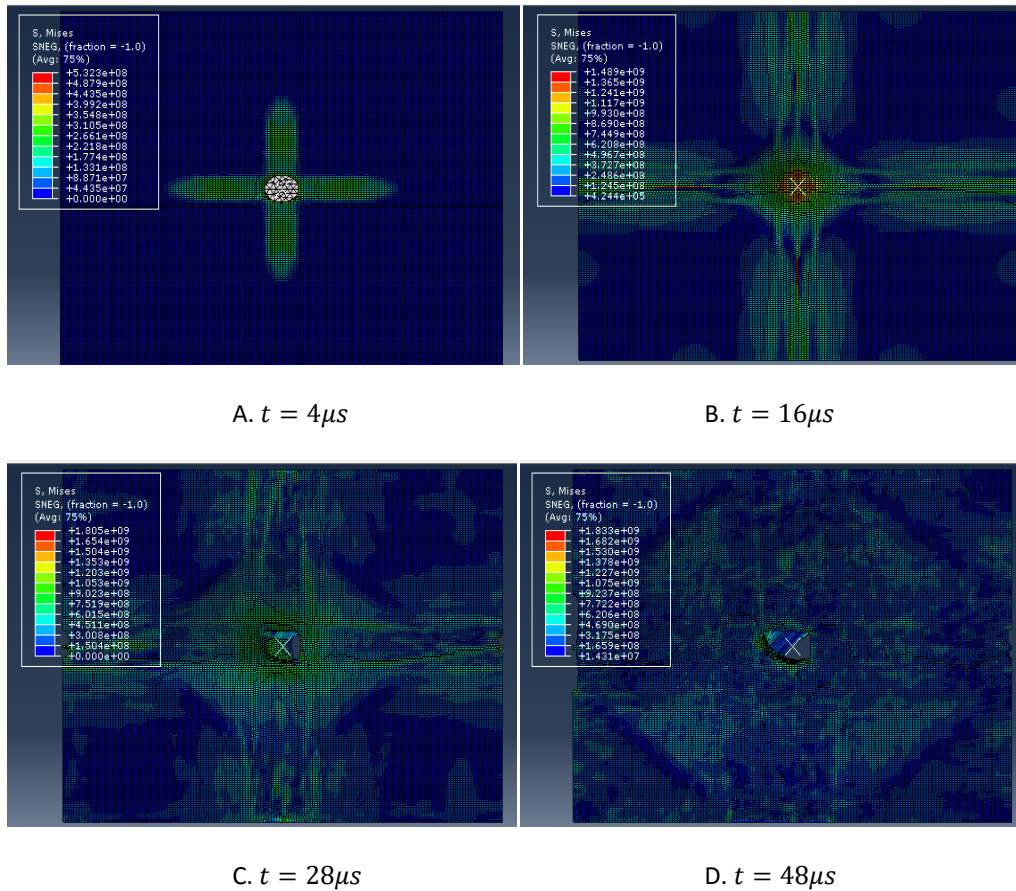


Figura 36: Imágenes de la evolución con el tiempo del mapa de tensiones para el impacto del proyectil cilíndrico a 175 m/s en una tela de una capa sujeta por sus cuatro laterales.

En este caso, se aprecian varias diferencias en las distintas etapas frente a la tela fija en dos laterales. La principal diferencia, que es la que distingue el modo de fallo de la tela con los cuatro laterales fijos respecto a las simulaciones anteriores en las que la tela sólo tenía dos laterales fijos, es que esta vez la tensión máxima de rotura a tracción se alcanza en los hilos principales en las dos direcciones, no sólo en una como ocurría antes. La causa por la que se alcanza esta tensión de fallo es la misma que en el caso de los dos laterales fijos ya que el proyectil sigue siendo el mismo.

Otra de las diferencias que se aprecian, es el tiempo en el que se desarrollan las distintas etapas. En este caso, como hemos comentado anteriormente sobre los resultados obtenidos, el proyectil perfora la tela con mayor facilidad, provocando que las distintas etapas que aparecen durante el impacto se desarrollen antes que para los impactos con dos laterales fijos.

6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1 Conclusiones

Una vez llevados a cabo todos los estudios y obtenidos los resultados de los mismos, podemos sacar algunas conclusiones en relación con los objetivos planteados al inicio del proyecto:

- Pese a tratarse el modelo desarrollado de un modelo macroscópico, incapaz de tener en cuenta todas las interacciones que se producen tanto a nivel mesoscópico entre los hilos que forman la tela como a nivel microscópico entre las fibras que forman los hilos, los resultados obtenidos concuerdan con los existentes en la literatura científica para ensayos numéricos y experimentales, tanto para el valor del límite balístico como para las velocidades residuales obtenidas, como queda demostrado en el apartado de validación del modelo. Por ello, podemos concluir que la aportación personal de un modelo macroscópico capaz de predecir el comportamiento mecánico de una tela de Kevlar KM2 frente a impacto balístico ha sido llevada a cabo con éxito.
- También podemos observar que estos resultados obtenidos durante el desarrollo del modelo concuerdan más con los obtenidos en ensayos experimentales que con los obtenidos en ensayos numéricos, lo que le da un valor añadido a nuestro modelo, ya que se acerca más a los valores reales que los artículos de ensayos numéricos utilizados para la validación.
- En cuanto a los estudios llevados a cabo posteriormente sobre el efecto de varios factores en el comportamiento balístico del sistema, de la misma manera, comparando los resultados obtenidos con los artículos tanto experimentales como numéricos existentes en la literatura científica, podemos certificar, con un alto grado de seguridad, la validez y fiabilidad de los resultados obtenidos en estos estudios. De esta manera, podemos afirmar que la aportación personal de varios estudios que muestran la influencia de varios factores en el comportamiento mecánico de un panel balístico de telas de Kevlar KM2 frente a impacto balístico ha sido también llevada a cabo con éxito.
- De los resultados obtenidos en el estudio del efecto del número de capas del panel balístico, donde hemos observado que la variación del límite balístico con el número de capas es ampliamente mayor para pocas capas que para muchas, y basándonos en la principal aplicación en la que hemos centrado este proyecto (defensa balística), donde hemos comentado varias veces la importancia del ratio resistencia/peso de las prendas corporales de protección balística, podemos afirmar que debe existir (se propone su cálculo para trabajos futuros) un número de capas óptimo para la elaboración de estas prendas, donde el aumento de este número de capas produzca un aumento insignificante en el límite balístico en relación con el aumento de peso que tiene lugar a su vez.

- De entre todos los parámetros que afectan al comportamiento balístico estudiados, observamos que el efecto de la geometría del proyectil tiene especial importancia en este comportamiento. Podemos apreciar grandes diferencias entre los tres tipos de proyectiles empleados, lo que nos hace llegar a la conclusión de que, aunque los sistemas de protección corporal como los chalecos antibala, son capaces de salvar vidas gracias a sus características, este tipo de prendas no son completamente impenetrables, existiendo calibres y geometrías de bala capaces de conseguir su perforación.
- En cuanto al estudio del efecto de las condiciones de contorno, observamos que este efecto es el que menos importancia tiene de los estudiados en el comportamiento balístico del sistema, sobre todo teniendo en cuenta que este efecto decrece con el aumento de la velocidad, cuando la principal aplicación en la que se ha centrado el proyecto es la de defensa balística, donde los impactos están realizados a altas velocidades.
- En todos los estudios realizados, los resultados obtenidos concuerdan con las consideraciones teóricas dadas en el apartado 2.3.3. donde se explicaba la influencia de los factores que afectan al comportamiento balístico del sistema, así como con las explicaciones dadas en el capítulo de análisis de resultados.

Por todas estas conclusiones podemos afirmar que se han conseguido con éxito todos los objetivos marcados al inicio del proyecto, así como se han realizado con éxito aportaciones técnicas personales en el campo estudiado.

6.2 Trabajos futuros

Tras la elaboración de este proyecto, se plantean los siguientes trabajos futuros para el campo de las prendas de protección balística, los cuales se pueden estructurar en tres vías:

- Mismo material empleado y mismas condiciones que en este proyecto.
 - Estudio de otros de los factores que influyen el comportamiento balístico de la tela, como la fricción, el tamaño de la muestra o las propiedades de la tela.
 - Estudios a nivel mesoscópico de la tela, modelándola a nivel del hilo, con objeto de tener en cuenta las interacciones entre ellos y obtener unos resultados a priori más precisos.
- Mismo material empleado con cambio de algunas condiciones.

- Estudio de impactos balísticos en telas cambiando la forma de las mismas, diseñándolas con la forma de la prenda en concreto a estudiar (chaleco antibalas, cascos...).
- Estudio de impactos balísticos en telas con aplicación a prendas de protección balística (en concreto chalecos antibalas) teniendo en cuenta la acción del cuerpo humano tras estas telas, modelándolo mediante materiales como plastilina o silicona y analizando el efecto que tienen los impactos en los cuerpos.
- Distinto material empleado.
 - Estudio de impactos en telas de otros materiales utilizados en defensa balística distintos al Kevlar, como son el Twaron, Dyneema, Spectra, Gold Flex o Dragon Skin.
 - Análisis del comportamiento balístico de telas según el material empleado (comparación).
 - Análisis del comportamiento frente a impacto balístico de la seda de araña, la cual se ha demostrado que tiene unas propiedades mecánicas magníficas, lo que ha provocado que se haya empezado a estudiar su aplicación en prendas de protección balística.



7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Newton, A. Fabric Manufacture: A Hand Book. Intermediate Technology Publications, 1993.
- [2] Behera, B. K. and Hari, P. K. Woven textile structure. Theory and applications. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010. Introduction: Woven Fabric Formation, pp. 3.
- [3] Dong, Z. and Sun, C. Testing and Modeling of Yarn Pull-Out in Plain Woven Kevlar Fabrics. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. Elsevier Ltd. ed., 2009, vol. 40.
- [4] Cheeseman, B. A. and Bogetti, T. A. Ballistic Impact into Fabric and Compliant Composite Laminates. Composite Structures. Elsevier Ltd. ed., 2003, vol. 61, pp. 161-173.
- [5] Diehl, T. and Dixon, R. The Development and use of a Robust Modeling Approach for Predicting Structural Performance of Woven Fabric using ABAQUS. 2003 ABAQUS Users Conference, 2003.
- [6] Technical Guide: Kevlar Aramid Fiber. Dupont Company ed.
- [7] Fibras Kevlar: Productos y Servicios. Disponible en: <<http://www.dupont.mx/productos-y-servicios/telas-fibras-notejidos/fibras/marcas/kevlar/productos/fibras-kevlar.html>>. Consultado el 12/4/16.
- [8] Safe Guard Clothing. Disponible en: <http://www.safeguardclothing.es/media/catalog/category/coovert_1_2_1__3.jpg>. Consultado el 22/5/16.
- [9] Protección Policía Nacional. Disponible en: <<http://controversia.es/wp-content/uploads/2014/08/oposiciones-policia-nacional-kevlar.jpg>>. Consultado el 22/5/16.
- [10] Cunniff, P.M. An analysis of the system effects of woven fabrics under ballistic impact. Text Res J. 1992, pp. 495–509.
- [11] Duan, Y. et al. Modeling the impact behavior of high-strength fabric structures. Presented at the Fiber Society Annual Technical Conference, Natick, Massachusetts, 2002.
- [12] Tabiei, A. and Nilakantan, G. Ballistic Impact of Dry Woven Fabric Composites: A Review. Applied Mechanics Review, 2008.
- [13] Cunniff, P.M. Dimensionless parameters for optimization of textile-based body armor systems. In: Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics. 1999, pp. 1303–1310.
- [14] Duan, Y. Personal communication, 2002.

- [15] Chitrangad. Hybrid ballistic fabric. United States Patent No. 5,187,003, 1993.
- [16] Shockey, D. A. et al. Improved Barriers to Turbine Engine Fragments: Interim Report III. Report No. DOT/FAA/AR- 99/8, III, 2004.
- [17] Shahkarami, A. et al. A Numerical Investigation of the Effect of Projectile Mass on the Energy Absorption of Fabric Panels Subjected to Ballistic Impact. 20th International Symposium on Ballistic, 2002, pp. 802–809.
- [18] Nilakantan, G. et al. Experimental Investigation of the Role of Frictional Yarn Pull-Out and Windowing on the Probabilistic Impact Response of Kevlar Fabrics. Composites Part B: Engineering. Elsevier Ltd. ed., 2014, vol. 68, pp. 215-229.
- [19] Chen, X. Modelling and predicting textile behaviour. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010. The Mechanical Behaviour of Woven Fabrics, pp. 145.
- [20] Ha-Minh, C. et al. Numerical Analysis of a Ballistic Impact on Textile Fabric. International Journal of Mechanical Sciences. Elsevier Ltd. ed., 2013, vol. 69.
- [21] King, M. J; Jearanaisilawong, P. and Socrate, S. A Continuum Constitutive Model for the Mechanical Behavior of Woven Fabrics. International Journal of Solids and Structures. Elsevier Ltd. ed., 2005, vol. 42, pp. 3867-3896.
- [22] Parsons, E. et al. Impact of Woven Fabric: Experiments and Mesostructure-Based Continuum-Level Simulations. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Elsevier Ltd. ed., 2010, vol. 58, pp. 1995-2021.
- [23] Rao, M. P. et al. Modeling the Effects of Yarn Material Properties and Friction on the Ballistic Impact of a Plain-Weave Fabric. Composite Structures. Elsevier Ltd. ed., 2008, vol. 89, pp. 556-566.
- [24] Duan, Y. et al. Finite Element Modeling of Transverse Impact on a Ballistic Fabric. International Journal of Mechanical Sciences. Elsevier Ltd. ed., 2006, vol. 48, pp. 33-43.
- [25] Briscoe, B.J. and Motamedi, F. The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: the influence of interfacial friction. 1992, pp. 229–47.
- [26] Duan, Y. et al. Modeling the role of friction during ballistic impact of a high-strength plain-weave fabric. Composite Structure, 2005, pp. 331–337.
- [27] Nilakantan, G. et al. Multiscale Modeling of the Impact of Textile Fabrics Based on Hybrid Element Analysis. International Journal of Impact Engineering. Elsevier Ltd. ed., 2010, vol. 37, pp. 1056-1071.

- [28] Ha-Minh, C. et al. Numerical Multi-Scale Modeling for Textile Woven Fabric Against Ballistic Impact. Computational Materials Science. Elsevier Ltd. ed., 2011, vol. 50, pp. 2172-2184.
- [29] Nilakantan, G. et al. On the Finite Element Analysis of Woven Fabric Impact using Multiscale Modeling Techniques. International Journal of Solids and Structures. Elsevier Ltd. ed., 2010, vol. 47, pp. 2300-2315.
- [30] Abaqus Users Manual 6.12. University of Cambridge. Disponible en: <https://things.maths.cam.ac.uk/computing/software/abaqus_docs/docs/v6.12/books/usb/default.htm>. Consultado el 22/4/16.
- [31] Rodríguez Millán, Marcos. Capítulo 3: Modelización Numérica: Composites. 2015.
- [32] Hashin, Z. and Rotem, A. A Fatigue Criterion for Fiber-Reinforced Materials. Journal of Composite Materials. 1973, vol. 7, pp. 448–464.
- [33] Hashin, Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites. Journal of Applied Mechanics. 1980, vol. 47, pp. 329–334.
- [34] Abaqus Users Manual 6.12. University of Cambridge. Disponible en: <https://things.maths.cam.ac.uk/computing/software/abaqus_docs/docs/v6.12/books/usb/default.htm>. Consultado el 22/4/16.
- [35] Duan, Y. et al. Modeling Friction Effects on the Ballistic Impact Behavior of a Single-Ply High-Strength Fabric. International Journal of Impact Engineering. Elsevier Ltd ed., 2005, vol. 31, pp. 996-1012.
- [36] Duan, Y. et al. Modeling the Role of Friction during Ballistic Impact of a High-Strength Plain-Weave Fabric. Composite Structures. Elsevier Ltd. ed., 2005, vol. 68, pp. 331-337.
- [37] Duan, Y. et al. Effects of friction on the ballistic performance of a high-strength fabric structure. In: Alves M, Jones N, editors. WIT Transactions on Engineering Sciences, Impact Loading of Lightweight Structures. 2005, pp. 219–229.
- [38] Phoenix, S. L. and Porwal, P. K. A New Membrane Model for the Ballistic Impact Response and V50 Performance of Multi-Ply Fibrous Systems. International Journal of Solids and Structures. Pergamon ed., 2003, vol. 40, pp. 6723-6765.
- [39] Cunniff, P.M. Vs–Vr relationships in textile system impact. In: Proceedings of the 18th International Symposium of Ballistics. 1999.
- [40] Shockey, D. A; Erlich, D. C. and Simons, J. W. Improved Barriers to Turbine Engine Fragments: Interim Report II. Report No. DOT/FAA/AR- 99/8, II. 1999.

- [41] Lim, C. T; Tan, V. B. C. and Cheong, C. H. Perforation of High-Strength Double-Ply Fabric System by Varying Shaped Projectiles. 2002, pp. 577–591.
- [42] Prosser, R.A; Cohen, S.H. and Segars, R.A. Heat as a factor in the penetration of cloth ballistic panels by 0.22 caliber projectiles. Text Res J, 2000, pp. 709–722
- [43] Shockey, D. A; Erlich, D. C. and Simons, J. W. Improved barriers to turbine engine fragments: Interim Report III. US Department of Transportation Federal Aviation Administration Report, DOT/ FAA/ER-99/8,III, 2001.

Abaqus Users Manual 6.12. University of Cambridge.

Chen, X. Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering: Number 66. Elsevier Ltd. ed., 2016.

Yang, H.H. Kevlar Aramid Fiber. John Wiley & Sons Ltd. ed., 1993.

Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. El Método de los Elementos Finitos. 4ª Edición, McGraw-Hill ed., 1993.